

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
Інститут телекомунікаційних систем
Телекомунікаційні системи та мережі**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Л.О. Уривський

« ____ » _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Підвищення продуктивності мультисервісної дуплексної
системи при використанні стандарту DVB-T2»**

Виконала:

студентка VI курсу, групи ТС-61м

Шевченко Марія Вячеславівна _____

Керівник:

д.т.н., проф.

Уривський Л.О. _____

Рецензент:

д.т.н., проф.

Жук С.Я. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студентка _____

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(172.3620.1 «Телекомунікаційні системи та мережі»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Л.О. Уривський

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту**

Шевченко Марії Вячеславівні

1. Тема дисертації «Підвищення продуктивності мультисервісної дуплексної системи при використанні стандарту DVB-T2», науковий керівник дисертації Уривський Леонід Олександрович д.т.н., проф., зав. кафедри, затверджені наказом по університету від «06» квітня 2018 р. №1105-с
2. Термін подання студентом дисертації 10.05.2018
3. Об'єкт дослідження – дослідження впливу перетворень інформації, які використовуються в DVB-T2, на продуктивність ліній зв'язку.
4. Предмет дослідження – використання сигнально-кодкових перетворень в дуплексній високошвидкісній лінії зв'язку.
5. Перелік завдань, які потрібно виконати:
 1. Дослідити телевізійний стандарт ефірного мовлення DVB-T2, його особливості та нововведення.
 2. З'ясувати актуальність дослідження використання стандарту DVB-T2 та запропонувати використання особливостей стандарту у високошвидкісній дуплексній лінії зв'язку.
 3. Обґрунтувати вибір типу телекомунікаційної мультисервісної дуплексної системи (МСДС) з використанням перетворень стандарту DVB-T2 та показники функціонування телекомунікаційної системи, зокрема, її продуктивності.

4. Дослідити стандарт DVB-T2 для використання його перетворень в МСДС. Обрати модель розрахунку та розрахувати для розповсюдження сигналу та згасання.

5. Дослідити основні показники продуктивності мережі за допомогою обраної моделі втрат. Розглянути вплив процедур обробки інформаційних потоків і сигналів на продуктивність МСДС.

6. Оцінити доцільність вдосконалення процедур обробки інформаційних потоків та сигналів задля підвищення продуктивності МСДС.

7. Надати пропозиції щодо підвищення продуктивності МСДС при передачі мультисервісної інформації.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Плакат №1 «Тема, мета, об'єкт та предмет дослідження магістерської роботи»

Плакат №2 «Завдання, що вирішуються у дослідженні»

Плакат №3 «Особливості стандарту DVB-T2 та вибір МСДС»

Плакат №4 «Порівняння методів розрахунку ймовірностей помилок»

Плакат №5 «Пропозиції щодо підвищення продуктивності МСДС при використанні перетворень стандарту DVB-T2»

Плакат №6 «Результат редукції параметрів сигнально-кодових конструкцій»

Плакат №7 «Висновки по виконаній роботі»

7. Перелік публікацій:

1. Uryvsky L.O., Shevchenko M.V. Perspectives of transformation of algorithms of noise-immune signaling of DVB-T2 standard into a duplex communication system // International Conference "TELECOMMUNICATIONS ISSUES - 2017".-p.458-461

2. Уривський Л.О., Шевченко М.В. Особливості передачі мультисервісних потоків в стандарті DVB-T2 та використання їх у дуплексній лінії зв'язку // XII МНТК «Проблеми телекомунікацій», ІТС НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», м. Київ, 2018.-с.48-51

8. Дата видачі завдання 01.11.2016

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Актуальність дослідження продуктивності мультисервісної дуплексної системи (МСДС) при використанні перетворень стандарту DVB-T2. Написання 1 розділу роботи.	15.10.17	Виконано у формі реферату
2	Аналіз стандарту DVB-T2 для використання його перетворень в МСДС. Написання 2 розділу роботи.	20.04.17	Виконано у формі реферату
3	Дослідження показників продуктивності вибраної МСДС при використанні стандарту DVB-T2. Написання 3 розділу роботи.	31.12.17	Виконано у формі реферату
4	Розрахунок втрат на лінії при розповсюдженні радіосигналу за моделлю розповсюдження Окамура-Хата.	20.02.18	Виконано у формі реферату
5	Пропозиції щодо підвищення продуктивності МСДС при використанні перетворень стандарту DVB-T2. Написання 4 розділу роботи.	30.03.18	Виконано у формі реферату
6	Належне оформлення роботи, написання висновків.	05.05.18	Виконано у формі магістерської дисертації

Студентка

М.В. Шевченко

Науковий керівник

Л.О. Уривський

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 102 с., 27 рис., 10 табл., 51 джерел.

Актуальністю дослідження стандарту телевізійного мовлення DVB-T2 являється те, що стандарт розроблений для підвищення ємності мереж цифрового телебачення як мінімум на 30% в порівнянні DVB-T, при незмінній інфраструктурі мережі та частотних ресурсах.

Новий стандарт є покращеним і функціонально розширеним послідовником стандарту DVB-T, але при цьому кожен етап перетворення сигналу удосконалений. Тому особливості стандарту цікаво аналізувати та запропонувати впровадження щодо використання їх у дуплексній лінії зв'язку.

Метою дослідження роботи є виявлення тих особливостей стандарту телевізійного мовлення DVB-T2, які можна запозичити для використання у дуплексній лінії зв'язку, та надати пропозиції щодо підвищення її продуктивності при передачі мультисервісної інформації.

Об'єктом дослідження роботи є дослідження впливу перетворень інформації, які використовуються в DVB-T2, на продуктивність ліній зв'язку.

Предметом дослідження є використання сигнально-кодових перетворень в дуплексній високошвидкісній лінії зв'язку.

Стандарт DVB-T2 передбачає надання різних цифрових сервісів та послуг на підставі мультисервісності потоків.

В даній роботі розглядається стандарт DVB-T2 та в межах цього стандарту досліджуються технології та параметри для того, щоб запропонувати удосконалення для підвищення продуктивності системи, та використати у дуплексній лінії зв'язку згідно підвищення продуктивності системи.

Даний стандарт являється технологією з односторонньою передачею, в якому зібраний найбільший набір поєднань модуляцій і кодування. Стандарт детально аналізується та приймається судження щодо використання його особливостей і їх направлення на дуплексні лінії, які реагують.

В роботі з'ясовуються та аналізуються фактори, що впливають на продуктивність, достовірність та на інші важливі показники системи зв'язку. Детально розглядаються такі параметри системи як модуляція, кодування та інші показники. За відомими формулами розраховуються та порівнюються ймовірності помилок для різних методів модуляції.

Аналізується та обирається за декількома критеріями модель для розрахунку затухання сигналу в лінії та продуктивності системи.

За результатами роботи оприлюднено дві науково-технічні доповіді: на XI-й Міжнародній конференції “Проблеми телекомунікацій” (на англійській мові) у 2017 році та на XII-й Міжнародній конференції “Проблеми телекомунікацій” у 2018 році.

Наукова новизна роботи полягає у дослідженні впливу всіх поєднань модуляцій та кодування стандарту з односторонньою передачею та використання їх у дуплексній мультисервісній системі.

СТАНДАРТ DVB-T2, МОДУЛЯЦІЯ, КОДУВАННЯ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, МУЛЬТИСЕРВІСНА ДУПЛЕКСНА СИСТЕМА, ДОСТОВІРНІСТЬ ЗВ'ЯЗКУ.

ABSTRACT

The relevance of the study of DVB-T2 TV broadcasting standard is that the standard is designed to increase the capacity of digital TV networks by at least 30% compared to DVB-T, with unchanging network infrastructure and frequency resources.

The new standard is an improved and functionally advanced DVB-T compliant, but each stage of the signal conversion has been improved. Therefore, it is interesting to analyze the features of the standard and to propose the implementation of their use in the duplex communication line.

The aim of the study is to identify the main features of the DVB-T2 television broadcast standard which can be borrowed for use in the duplex communication line, and offer suggestions in the transmission of multiservice information to increase productivity.

The object of the research work is to study the impact of information transformations used in the DVB-T2 standard on the productivity of communication lines.

The subject of research work is using of the signal-coding conversions in a duplex high-speed communication line.

The DVB-T2 standard provides various digital services and services based on multi-service streams.

In this paper, the DVB-T2 standard is considered and within this standard technologies and parameters are explored in order to offer improvements to the system performance, and to use in a duplex communication line in order to improve system performance.

This standard is a one-way technology, which assembled the largest set of modulation and encoding combinations. The standard is analyzed in detail and decided to use its features to duplex lines that could react on changes in line.

The work analyzes the factors influencing productivity, reliability and other important indicators of the communication system. Detailed parameters of the

system such as modulation, coding and other indicators are considered in detail. According to known formulas, the probabilities of errors for different modulation methods are calculated and compared.

The model for calculating signal attenuation in line and system performance are analyzed and selected according to several criteria.

As a result of the work, two scientific and technical reports were published: on the XI-th International conference (in English) in 2017 and on the XII-th International conference "Telecommunication problems" in 2018.

The scientific novelty of the work is to investigate the effects of all modulation combinations and standardized encoding with one-way transmission and use them in a duplex multiservice system.

DVB-T2 STANDARD, MODULATION, CODING, PRODUCTIVITY, MULTISERVICE DUPLEX SYSTEM, COMMUNICATION RELIABILITY.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	11
ВСТУП.....	12
1. АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ ДУПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ (МСДС) ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПЕРЕТВОРЕНЬ СТАНДАРТУ DVB-T2	15
1.1 Обґрунтування завдань, функцій і структури МСДС та визначення особливостей ТКС, у порівнянні з ТВ системами зі стандартом DVB-T2 ..	15
1.2 Обґрунтування вибору типу телекомунікаційної МСДС з використанням перетворень стандарту DVB-T2	22
1.3 Обґрунтування показників функціонування МС телекомунікаційної системи, зокрема пропускної здатності та продуктивності	26
1.4 Цілі та постановка задачі роботи	33
Висновки до розділу 1	33
2. АНАЛІЗ СТАНДАРТУ DVB-T2 ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ЙОГО ПЕРЕТВОРЕНЬ В МСДС	36
2.1 Аналіз процедур обробки МС інформаційних потоків у стандарті DVB- T2.....	36
2.2 Пропозиції щодо доцільності використання процедур обробки інформації стандарту DVB-T2 у МСДС	38
2.3 Аналіз процесу обробки сигналу у стандарті DVB-T2	47
2.4 Пропозиції щодо доцільності використання обробки сигналу у стандарті DVB-T2	52
Висновки до розділу 2	55
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ ВИБРАНОЇ МСДС ПРИ ВИКОРИСТАННІ СТАНДАРТУ DVB-T2	57
3.1 Особливості визначення показників продуктивності в МСДС.....	57
3.2 Дослідження математичних моделей перетворення сигналів МСДС	64

3.3 Аналіз впливу процедур обробки сигналів на продуктивність МСДС ..	69
Висновки до розділу 3	73
4. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МСДС ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПЕРЕТВОРЕНЬ СТАНДАРТУ DVB-T2	74
4.1 Аналіз способів підвищення продуктивності МСДС.....	74
4.2 Методика розрахунку продуктивності системи з урахуванням особливостей стандарту DVB-T2	77
4.3 Розрахунок продуктивності системи з урахуванням особливостей стандарту DVB-T2	81
4.4 Пропозиції щодо вдосконалення процедур стандарту DVB-T2 для транспортування, прийому та обробки інформаційних потоків у МСДС ...	87
Висновки до розділу 4	90
ВИСНОВКИ	91
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	94
ДОДАТОК А	99
ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИГНАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB	99

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БС	Базова станція
БЧХ	Код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема
МСДС	Мультисервісна дуплексна система
СКК	Сигнально-кодові конструкції
СНГ	Співдружність незалежних держав
ТБ	Телебачення
ТВЧ	Телебачення високої чіткості
ВВ	Base Band - основна смуга частот
BER	Bit Error Rate – бітовий коефіцієнт помилок
BPSK	Binary Phase Shift Keying – двухпозиційна фазова модуляція
DVB-T	Digital Video Broadband Terrestrial - стандарт цифрового широкосмугового телебачення
GSE	Generic transport Stream Encapsulation - інкапсуляція загального транспортного потоку
IP	Internet Protocol - інтернет протокол
LDPC	Low Density Parity Check Code - код з низькою щільністю перевірки на парність
MPEG	Moving Picture Experts Group - Експертна група з питань рухомого зображення
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing – ортогональне частотне мультиплексування
PLP	Physical Layer Pipes - канал фізичного рівня
QAM	Quadrature Amplitude Modulation – квадратурна амплітудна модуляція
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying – квадратурно-фазова модуляція

ВСТУП

За останні десятиліття цифрові комунікації вступили в фазу бурхливого розвитку, яка активно продовжується і в теперішній час. Для цього сприяють, з одного боку, інтенсивний розвиток глобальної мережі Інтернет, а з іншого - впровадження нових, прогресивних методів кодування, модуляції і передачі інформації.

На сьогоднішній день безпроводові широкосмгові мережі практично досконаліші за інші мережі на підставі швидкого їх розгортання, ціною і можливістю впроваджувати нові додатки, що значно економніше за інші рішення. У зв'язку з цим досить актуальною є подальша розробка фундаментальної теорії в області передачі інформації.

Європейським співтовариством, компанією DVB на початку 90-х років минулого століття було розпочато розробку цифрових стандартів телебачення, які отримали назву DVB (англ. Digital Video Broadcasting) в дослівному перекладі - цифрове відео мовлення.

Розроблені стандарти були стандартизовані "Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів" і набули статусу стандарту цифрового мовлення на території Європейського співтовариства.

Стандарти постійно допрацьовувалися стандартизуючи нові можливості телебачення, як приклад можливість прийому телепередач не тільки в стандарті SD але і HD, а також в майбутньому перехід на прийом телепередач в форматі 3D. Стандартів DVB прийнято близько трьох десятків, стандартизуються не тільки основні напрямки телебачення, такі як, ефірне, кабельне, супутникове, мобільне мовлення, а також і інші напрямки передача субтитрів, телетексту, IP-телебачення, а й інші.

Останні розроблені стандарти орієнтовані для передачі зображення класу HD, високої чіткості, не тільки по кабельних мережах, а й по ефіру та з супутника.

Стандарт DVB-T2 (Digital Video Broadcasting - Terrestrial 2nd generation) має безліч переваг над DVB-T за рахунок більшої надійності сигналу, а також більшої гнучкості та ефективності. Це дозволяє передавати SD, HD та інші сигнали різної чіткості. За допомогою цього значно економиться майже 40% пропускної здатності. Відомо, що з 2014 року стандарт DVB-T2 вже використовується у більш ніж 25 країнах.

Метою дослідження роботи є виявлення тих особливостей стандарту телевізійного мовлення DVB-T2, які можна запозичити для використання у дуплексній лінії зв'язку, та надати пропозиції щодо підвищення її продуктивності при передачі мультисервісної інформації.

Об'єктом дослідження роботи є дослідження впливу перетворень інформації, які використовуються в DVB-T2, на продуктивність ліній зв'язку.

Предметом дослідження є використання сигнально-кодових перетворень в дуплексній високошвидкісній лінії зв'язку.

Відповідно до мети основними задачами роботи є:

1. Дослідити телевізійний стандарт ефірного мовлення DVB-T2, його особливості та нововведення.
2. З'ясувати актуальність дослідження використання стандарту DVB-T2 та запропонувати використання особливостей стандарту у високошвидкісній дуплексній лінії зв'язку.
3. Обґрунтувати вибір типу телекомунікаційної мультисервісної дуплексної системи (МСДС) з використанням перетворень стандарту DVB-T2 та показники функціонування телекомунікаційної системи, зокрема, її продуктивності.
4. Дослідити стандарт DVB-T2 для використання його перетворень в МСДС. Обрати модель розрахунку та розрахувати для розповсюдження сигналу та затухання.
5. Дослідити основні показники продуктивності мережі за допомогою обраної моделі втрат. Розглянути вплив процедур обробки інформаційних потоків і сигналів на продуктивність МСДС.

6. Оцінити доцільність вдосконалення процедур обробки інформаційних потоків та сигналів задля підвищення продуктивності МСДС.

7. Надати пропозиції щодо підвищення продуктивності МСДС при передачі мультисервісної інформації.

У першому розділі визначається мета роботи та основні задачі, розглядається актуальність дослідження продуктивності мультисервісної дуплексної системи при використанні перетворень стандарту DVB-T2, а саме: цитування головних особливостей телевізійного стандарту; функції, структура та вибір типу телекомунікаційної МСДС; вплив різних факторів на пропускну здатність та продуктивність системи.

Другий розділ включає в себе аналіз телевізійного стандарту та процедур обробки, передачі та прийому сигналів, проводиться порівняльний аналіз просторових моделей та обирається лише одна для розрахунку показників МСДС, у тому числі й продуктивності.

Третій розділ присвячений дослідженню показників продуктивності вибраної МСДС при використанні стандарту DVB-T2. Описуються особливості визначення продуктивності, пропускну здатності. За допомогою декількох методик розрахунку ймовірності символної та бітової помилки проводиться зіставлення даних та їх аналіз. Обґрунтовуються фактори для підвищення продуктивності телекомунікаційної системи.

У четвертому розділі за вибраною методикою проводиться розрахунок моделі затухання сигналу та надаються пропозиції щодо підвищення продуктивності МСДС при використанні перетворень стандарту DVB-T2.

Отже, магістерська робота присвячена головним особливостям стандарту DVB-T2 та розробці пропозицій щодо створення такої високошвидкісної дуплексної лінії зв'язку, які запозичуються зі стандарту з метою підвищення продуктивності при передачі мультисервісної інформації.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МУЛЬТИСЕРВІСНОЇ ДУПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ (МСДС) ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПЕРЕТВОРЕНЬ СТАНДАРТУ DVB-T2

1.1 Обґрунтування завдань, функцій і структури МСДС та визначення особливостей ТКС, у порівнянні з ТВ системами зі стандартом DVB-T2

Сучасний етап розвитку науки і техніки характеризується бурхливим розвитком інформаційних технологій, в яких помітне місце відводиться передачі інформації. Під інформацією розуміють набір відомостей про будь-які процеси, події, факти або предмети. Людина отримує інформацію через органи чуття (зору, слуху і т.д.), і фізіологічні можливості людини не дозволяють забезпечувати передачу великих обсягів інформації на значні відстані.

Технічні засоби, що забезпечують передачу і прийом інформації, об'єднуються поняттям зв'язок (від лат. Communication - зв'язок, телекомунікації).

У теорії зв'язку сукупність відомостей, призначених для передачі і представлених в певній формі, називають повідомленням. Так, сполученням є текст листа, телеграми, оголошення, передачі по радіо чи телебаченню і т.д. В якості матеріального носія для передачі повідомлень в техніці зв'язку використовують різні знаки або символи. Це можуть бути літери, цифри та інші знаки текстового повідомлення, спеціальні знаки на різних схемах і діаграмах, наприклад, знаки дорожнього руху. У техніці електрозв'язку кожного повідомлення ставиться у відповідність набір електричних сигналів.

Сукупність технічних засобів для передачі повідомлень від джерела до споживача називається системою зв'язку. Обов'язковими компонентами будь-якої системи зв'язку незалежно від виду переданих повідомлень є передавальний пристрій, лінія зв'язку і приймальний пристрій.

Однією з важливих і складних завдань стандартизації цифрового телевізійного мовлення було використання ефективних методів передачі телевізійних програм по наземним, супутниковим і кабельним системам зв'язку.

Принциповою особливістю розробки таких стандартів є облік технологічних особливостей різних ділянок телевізійного каналу, жорстких міжнародних норм на параметри каналів передачі телевізійних сигналів, принципів планування мереж мовлення.

Цифрове стиснення сигналів динамічних зображень і звукового супроводження телебачення в поєднанні з цифровим канальним кодуванням і модуляцією дозволяють істотно підвищити ефективність використання частотних ресурсів в порівнянні з аналоговими телевізійними системами [9].

Актуальністю дослідження стандарту телевізійного мовлення DVB-T2 являється насамперед те, що він був розроблений для підвищення ємності мереж цифрового телебачення як мінімум на 30% в порівнянні DVB-T, при незмінній інфраструктурі мережі та частотних ресурсах.

Новий стандарт є покращеним і функціонально розширеним послідовником стандарту DVB-T (добавлені такі особливості як скремблювання, перемеження даних та оновлене кодування), але при цьому кожен етап перетворення сигналу удосконалений. Час не стоїть на місці та прогрес не зупинити, тому на зміну одним стандартам приходять інші.

Однією з найбільш перспективних технологій цифрового мовлення є проект стандарту DVB-T2 [35]. Нижче перераховані найбільш важливі відмінності останнього в порівнянні з класичним стандартом DVB-T:

- збільшення кількості несучих до 27265 (режим 32K);
- відмова від класичної схеми кодування (згортковий код і код Ріда-Соломона) і заміна його на LDPC (Low-density parity-check code) і БЧХ (Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема);
- додавання нового режиму модуляції 256QAM;
- більш "економна" передача службової інформації.

Таблиця 1.1. Порівняння основних відмінностей поколінь стандартів DVB-T і DVB-T2

Параметр	DVB-T	DVB-T2
Кодування	Згорткове кодування, код Ріда - Соломона Швидкості: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	Код з малою щільністю перевірок на парність (LDPC), кодування Боуза - Чоудхурі-Хоквінгема (БЧХ) Швидкості: 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Режими модуляції несучих	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Захисні інтервали	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16, 1/32, 1/128
Розмір ДПФ	2k, 8k	1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k
Кількість несучих	1705, 6817	853, 1705, 3409, 6817, 13633, 27265
Максимальна швидкість передачі при с/ш 20 дБ	31,7 Мбіт/с	45,5 Мбіт/с
Необхідний рівень с/ш для забезпечення 24 Мбіт/с	16,7 дБ	10,8 дБ

Основною перевагою останнього варіанту системи наземного цифрового телевізійного мовлення DVB-T2 є високий ступінь адаптивності до умов функціонування. Дана система забезпечує необхідні вимоги до якості передачі сигналів, має високу завадостійкість. Однак і тут в неповній мірі вирішені питання щодо спотворень, обумовлених впливом високого пік-фактора, ефективної компенсації спотворень відеоінформаційного сигналу, підвищених вимог до характеристик передавача радіосигналів, так і приймального обладнання і т.д.

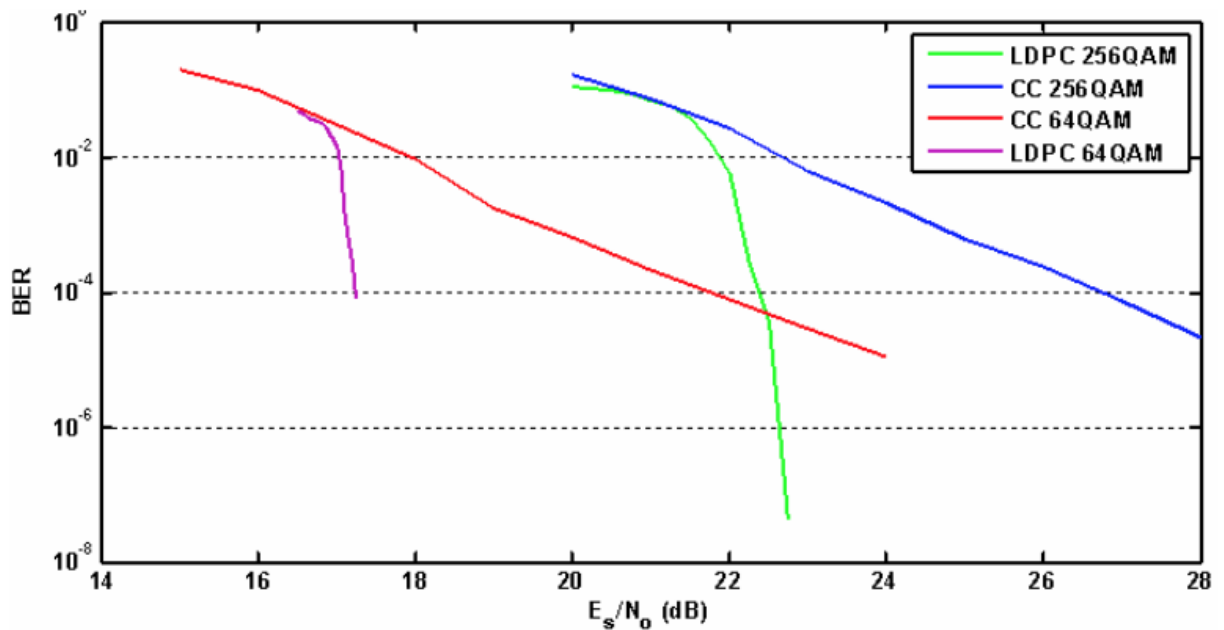


Рисунок 1.1. Порівняння методів кодування стандартів DVB-T і DVB-T2

У той же час стандарт DVB-T2 оголошений єдиним для мереж цифрового ефірного ТБ мовлення в країнах СНГ, і в даний час актуальним є питання про використання ТВЧ контенту в другому і третьому мультиплексах. У зв'язку з цим актуальним напрямом роботи являється впровадження характеристик систем стандарту DVB-T2 в мультисервісну дуплексну систему, які забезпечать зменшення ступеню впливу пік-фактора, зниження спотворень стиснення і передачі відповідних радіосигналів в умовах реального функціонування.

При проектуванні систем ефірного цифрового телевізійного мовлення, задіяних в трансляції сигналу стандарту DVB-T2, як правило, вибирають з умов, щоб домогтися 95% часу і 95% покриття завадостійким сигналом заданої території [3]. Для вирішення завдань по охопленню населення регіонів мовленням пакетами телевізійних програм, система ефірного цифрового телевізійного мовлення повинна забезпечувати формування зони обслуговування з заданим рівнем напруженості поля (випромінюваною потужністю).

Визначити вихідну потужність передавача для забезпечення заданої напруженості електромагнітного поля в точці можна декількома методами (формула Веденського, моделі Окумура-Хата і т.д.), але в зазначених методах/моделях не враховуються граничні умови, які можуть істотно впливати на розміри зон покриття і відповідно на охоплення територій [3].

Зазвичай ситуація ускладнюється тим, що при розрахунку необхідної вихідної потужності (або напруженості поля) потрібно враховувати й інші параметри: тип модуляції сигналу, швидкість транспортного потоку, висоту підвісу передавальної антени і т.п.

Недоліком методів планування зон покриття є їх обмеженість в оперуванні комбінаціями параметрів модуляторів цифрових телевізійних передавачів (захисний інтервал, символна швидкість, кількість несучих частот і т.д.) [20]. Щоб удосконалити метод визначення зони покриття і привести розрахунки до більш точних результатів вводять критерії, яким даний метод повинен відповідати.

В час постійного безупинного розвитку сучасного світу, в першу чергу, стрімкими темпами розвиваються технології, а, отже, ростуть й потреби користувачів, які вимагають інтеграції нових послуг. За останні роки активних обертів набирає перехід від різного роду телекомунікаційних систем, кожна з яких була призначена для надання вузького кола послуг, до мереж наступного покоління або, як їх ще називають, мультисервісних мереж.

В таких системах послуги як передача голосу, даних та відео передаються одночасно зі швидкістю, перевищеною в кілька разів існуючої швидкості передачі даних.

Даний підхід базується на інтеграції всіх користувачів в єдину широкосмгову мережу, яка надає різні види сервісів - високошвидкісний доступ в Інтернет, телебачення, IP-телефонію і різні мультимедійні сервіси. Тому основною задачею мультисервісної мережі являється забезпечення взаємодії різних комунікаційних підсистем таким чином, щоб для передачі

голосу, даних і відео використовувалася єдина інфраструктура, дозволяючи при цьому зменшити різний тип обладнання та застосовуючи єдині технології і стандарти.

Функціональна модель мережі наступного покоління [9] в загальному вигляді може бути представлена трьома рівнями - транспортним, управління комутацією і передачею інформації, управління послугами.

До основних задач транспортного рівня відноситься прозора передача інформаційних потоків, а також підтримка взаємозв'язку з існуючими мережами зв'язку. На рівні управління комутацією і передачею відбувається обробка інформації сигналізації. Останній рівень управління послугами дозволяє управляти логікою послуг та додатків.

Структуру мультисервісної мережі можна представити у вигляді декількох основних рівнів: магістральний рівень - Core, рівень розподілу і агрегування - Aggregation, і рівень доступу - Access (рис. 1.2). Магістральний рівень є універсальною високошвидкісною і, по можливості, однорідною платформою передачі інформації, реалізованою на базі цифрових телекомунікаційних каналів.

Рівень розподілу включає вузлове обладнання мережі оператора, а рівень агрегування виконує завдання агрегації трафіку з рівня доступу і підключення до магістральної (транспортної) мережі. Рівень доступу включає корпоративні або внутрішньо-будинкові мережі, а також канали зв'язку, що забезпечують їх підключення до вузла розподілу мережі.

Мультисервісні мережі дозволяють підтримувати такі види послуг як мобільний зв'язок, виділені цифрові канали з постійною швидкістю передачі, передача відеозображень, відеоконференцзв'язок, IP-телефонія, широкосмуговий доступ в Інтернет, а також телебачення.

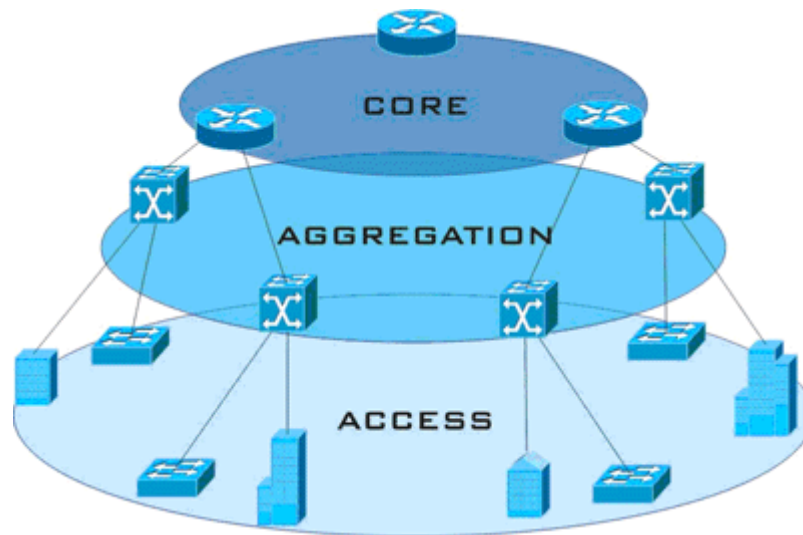


Рисунок 1.2. Структура мультисервісної системи

Удосконалення і розвиток сучасних мультимедійних систем пов'язано не тільки з реалізацією ефективних методів стиснення різних видів інформації, а й її передачі в реальних мережах зв'язку і мовлення, призначених для доставки контенту телерадіомовлення, відеоконференцзв'язку та ряду додаткових послуг передачі даних.

Такі мережі, як правило, призначені для досягнення заданих якості обслуговування і режимів передачі/прийому (наприклад, з використанням наземних, супутникових і кабельних мереж, Інтернету) [11].

Стандарт цифрового телевізійного мовлення DVB-T2 це - потужний інструмент мультисервісного мовлення, в який закладені величезні можливості по розширенню функціональності.

Звичайно, в силу своєї односпрямованості він не може розглядатися як конкурент традиційним мережним технологіям, але своє місце в наступну епоху технологій широкосмугового бездротового зв'язку четвертого покоління (4G) він, безумовно, знайде. І, можливо, буде при цьому не тільки вузькоспеціалізованим засобом доставки телевізійного контенту.

1.2 Обґрунтування вибору типу телекомунікаційної МСДС з використанням перетворень стандарту DVB-T2

Оскільки стандарт DVB-T2 є поліпшеним і функціонально розширеним послідовником стандарту DVB-T, кожний етап перетворення являється більш довершеним і удосконаленим.

Для вибору телекомунікаційної МСДС необхідно задатися декількома параметрами.

Для даної роботи необхідно вибрати дуплексну лінію зв'язку, яка за своїм походженням здатна реагувати на зміні в каналі. Тобто вибрати таку дуплексну лінію, де умови передачі сигналу змінюються. Також одною умовою для вибору буде виступати тип середовища поширення каналу зв'язку.

Під даний опис підходить такий вид дуплексного зв'язку як мобільний зв'язок (стільниковий, рухомий, бездротовий).

Коли потреба користувачів постійно перебувати на зв'язку, й не тільки в деякій околиці точки доступу (телефонної розетки), а й на значно більшій території призвела до того, що була реалізована технологія стільникового зв'язку.

При цьому підключення абонента в мережу і споживання послуг відбувається не за допомогою включення абонентського пристрою в телефонну розетку, а шляхом взаємодії між пристроєм і радіомережею оператора. Дана мережа організовується за допомогою базових станцій, об'єднаних в єдину мережу і забезпечують зону радіопокриття оператора зв'язку.

Мережі стільникового зв'язку побудовані таким чином, що мобільні абоненти можуть знаходитися або рухатися на деякі відстані без перерви сигналу. Режим роботи мобільного зв'язку являється дуплексним (двостороннім), як для абонента-передавача інформації, так і до одержувача, і навпаки.

Відомо, що основне завдання системи зв'язку - це передача різновидної інформації (передача мови, відео, факсимільна передача та інше) в будь-яке місце при реальному плині часу. Саме таке завдання в системах телефонного зв'язку, до появи мобільного зв'язку, раніше виконувалось в якості кабельної лінії зв'язку, або в якості автоматичних телефонних станцій.

Такою мережею абонент може користуватися лише через дротову абонентську лінію до автоматичних телефонних станцій і його переміщення в просторі на деякі відстані може призвести пропаданню сигналу. Даний мінус стаціонарної телефонної мережі може усунутися за рахунок шляхом заміни кабельної абонентської лінії бездротовим радіоканалом в мережах мобільного зв'язку.

Щодо частоти роботи каналів мобільного зв'язку, виділяють декілька каналів: 450/800 МГц, 900 МГц та 1800 МГц, а в стандарті DVB-T2 прийняті до використання радіочастоти метрового 174-230 МГц і дециметрового діапазонів частот 470-790 МГц.

Покриття зони мобільного радіозв'язку будується за рахунок поділу мережі на своєрідні зони радіосот, які являються зонами покриття базової станції (БС). Дані радіосоти перекриваються й разом утворюють мобільну стільникову мережу.

За останні півстоліття стільниковий зв'язок набув великих змін, об'єм послуг, які надаються користувачу значно виріс. З розвитком поколінь мобільної телефонії з'явилися такі різновиди послуг як у таблиці 1.2.

Згідно даних таблиці по видам послуг, які надаються, можна дійти висновку, що мобільний зв'язок являється мультисервісним видом зв'язку та відповідає вище вказаним вимогам для цілей магістерської дипломної роботи.

Дану мережу також можна розгортувати в надзвичайних умовах. Наприклад, коли майже немає часу на вимір сигналів та підстроювання обладнання мережі. Тому для цього може бути використаний механізм

запозичення перетворень з ефірного цифрового стандарту телебачення DVB-T2 в дуплексну високошвидкісну лінію зв'язку.

Таблиця 1.2. Порівняння поколінь стільникового зв'язку за видами послуг та швидкістю передачі даних

Покоління	Послуги	Передача даних
1G	Телефонний зв'язок (аналогова передача мови)	1,9 кбіт/с
2G	<ul style="list-style-type: none"> ● Телефонний зв'язок (цифрова передача мови) ● Прийом/відправка SMS ● Прийом/відправка факсів ● Голосова пошта ● Доступ в Інтернет 	9,6 - 14,4 кбіт/с
2,5G	<ul style="list-style-type: none"> ● Телефонний зв'язок (цифрова передача мови) ● Прийом/відправка довгих SMS ● Конференції ● Прийом/відправка аудіо/відео файлів ● Прийом/відправка факсів ● Голосова пошта ● Доступ в Інтернет ● Радіо/MP3 ● Мультиігри ● Послуги, засновані на місцезнаходження клієнта 	до 153 кбіт/с

Продовження таблиці 1.2

3G	<ul style="list-style-type: none"> ● Телефонний зв'язок (цифрова передача мови) ● Доступ в Інтернет ● Віддалений доступ до корпоративної мережі ● Прийом/відправлення текстових повідомлень ● Прийом/відправка ел. пошти ● Прийом/відправка аудіо/відео файлів ● Голосова пошта ● Послуги, засновані на місцезнаходження абонента ● Відеопошта ● Відеотелефонія ● Доступ в Інтернет ● TV/Відеоплеєр 	2,4 - 4,9 Мбіт/с
4G	<ul style="list-style-type: none"> ● Велика ємність мережі ● Технологія побудована на IP протоколі ● Підтримує всі мультимедіа ● Швидкість досягає 100 Мбіт/с 	100 Мбіт/с - 1 Гбіт/с

В даній магістерській роботі необхідно буде запропонувати таку дуплексну стільникову лінію з особливостями показників стандарту DVB-T2, яка буде реагувати на зміни на лінії у випадку термінового розгортання мережі у надзвичайних умовах, коли часу на точні розрахунки енергетики немає, а умови багатопроміневості змінюються.

Розрахунки дуплексної стільникової лінії будуть розраховуватися згідно звичайних умов розповсюдження сигналу, але з тою умовою, що у будь-який потрібний момент система зможе адаптуватися до оточуючих умов і застосувати алгоритм адаптації. Дана модель адаптації описується та прораховується у наступних розділах роботи.

1.3 Обґрунтування показників функціонування МС телекомунікаційної системи, зокрема пропускної здатності та продуктивності

Популярність до мультисервісних мереж зв'язку телекомунікаційних послуг неодмінно зростає з кожним роком. Окремі види послуг об'єднуються в єдину мультисервісну мережу і саме це збільшує оперативність обміну інформацією, тим самим забезпечуючи доступність даних в будь-який час. Інтеграція трафіку різнорідних даних і мови дозволяє якісно підвищити ефективність, а також знижує витрати на створення і експлуатацію мережі [28].

Стандарт DVB-T2 являється покращеною версією стандарту DVB-T, в якого процеси перетворення та обробки сигналу досконаліші, або й зовсім нові. Так, наприклад, якщо порівнювати результати, що досягаються швидкостями цифрового потоку першого і другого поколінь, то у випадку стандарту DVB-T мінімальна швидкість передачі - 4,9 Мбіт/с, а максимальна - 31,6 Мбіт/с, а у стандарті DVB-T2 - 7,4 Мбіт/с і 50,5 Мбіт/с відповідно.

З порівняння можливих максимальних швидкостей цифрового потоку, що передаються по каналах цифрового телевізійного мовлення систем першого і другого поколінь стандартів, впливає суттєве збільшення ефективності використання стандартних каналів зв'язку

Найголовніша характеристика каналу зв'язку його пропускна здатність, яка являє собою максимальну швидкість передачі інформації за деякий проміжок часу. Ще одною не менш важливою характеристикою вважається фактична швидкість передачі інформації – продуктивність.

Слід зауважити, що мірою наближення продуктивності каналу зв'язку до його пропускної здатності характеризується інформаційною ефективністю системи передачі інформації [25].

Так, наприклад, якщо при використанні стандарту ефірного мовлення DVB-T через канал з пропускною здатністю 8 МГц можливо максимально передати до 14 програм стандартного телебачення або не більше 6 програм телебачення високої чіткості, то при переході на стандарт DVB-T2 ці дані можуть бути збільшені приблизно в 1,5 рази - до 25 і 10 відповідно.

Використання сигнально-кодових конструкцій (СКК надалі) в DVB-T2 дозволяє досить ефективно використовувати ресурси каналу, адже одночасно можливо отримати вигаш як з енергетичної, так частотної ефективності або, у всякому разі, отримати вигаш по одному показнику, не погіршуючи інший. Тим самим, використовуючи оптимальні комбінації сигнально-кодових конструкцій досягається найкраща інформаційна ефективність - відношення пропускної здатності до продуктивності при обмежених ресурсах каналу зв'язку і одночасно задовольняються вимоги до необхідного рівня достовірності інформації.

Перехід від двійкових сигналів в радіоканалі до багатопозиційних сигналів призводить до підвищення продуктивності в 1,5-2 рази при одночасному істотному зниженні енергетичної ефективності. Більш детальний вплив СКК на продуктивність системи та його розрахунок описаний у 4 розділі.

В стандарті DVB-T вся смуга частот використовується для передачі одного транспортного потоку. В новому стандарті DVB-T2 застосовується концепція Physical Layer Pipes (PLP - канали фізичного рівня), тобто передача в одному фізичному каналі декількох логічних каналів. Існує два режими передачі: з передачею одного PLP - режим "А", з передачею декількох PLP - режим "В". В останньому транспортні потоки передаються одночасно, причому кожен з яких знаходиться в своєму PLP [3].

Саме це дозволяє забезпечити існування в одному радіочастотному каналі послуг, що передаються з різними ступенями завадостійкості: режим модуляції завадостійкого кодування може вибиратися для кожного PLP окремо, тобто оператор вибирає між високою швидкістю передачі та кращою завадостійкістю для кожної програми в пакеті.

В системі DVB-T2 використовується транспортний потік Moving Picture Experts Group (надалі MPEG) й транспортний потік загального призначення Generic transport Stream Encapsulation (надалі GSE) для інкапсуляції інформації [3]. Використання GSE дозволяє знизити об'єм службової інформації і робить адаптацію транспортного потоку до мережі більш гнучкою.

Для підвищення пропускної здатності додатково введений режим модуляції 256-QAM і розмірності перетворення Фур'є 16k і 32k. Завадостійкість, у свою чергу, підвищується за рахунок нових алгоритмів кодування та обертання сигнального сузір'я.

У стандарті DVB-T не використовувалась модуляція 256-QAM. Згорткові коди і коди Ріда-Соломона не забезпечили б належного захисту від помилок. Дана проблема вирішена в стандарті DVB-T2. Основними механізмами, що дозволяють підвищити стійкість системи, являються нові алгоритми кодування і обертання сигнального сузір'я.

В стандарті DVB-T2 замість згорткових кодів застосовуються коди з низькою щільністю перевірки на парність (LDPC), а замість коду Ріда-Соломона - короткий код Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема (БЧХ). Залежності коефіцієнта бітових помилок (BER) від відносини сигнал/шум представлені на рисунку 1.2.

Виграш щодо відношення сигнал/шум за рахунок використання нових методів завадостійкого кодування для стандарту DVB-T2 при ідентичному BER складає 5 дБ [20].

Ще одним нововведенням в стандарті DVB-T2 є обертання сигнального сузір'я, що дозволяє поліпшити завадостійкість системи.

Цю процедуру можна трактувати так, що кожний згенерований символ модуляції обертається в комплексній площині на певний кут в залежності від кількості рівнів модуляції (29° для QPSK, $16,8^\circ$ для 16-QAM, $8,6^\circ$ для 64-QAM і $\arctg(1/16)$ для 256-QAM). Крім того, перед початком повороту квадратурна (Q) координата кожного символу модуляції циклічно зсувається в межах одного і того ж кодового слова.

Такий поворот може значно підвищити стійкість сигналу для типових проблем ефіру. Повертаючи діаграму до точного заданого кута, кожна точка сузір'я отримує унікальні координати (Q-координати і I-координати), які не повторюються точками, що залишилися.

Таким чином, якщо одна несуча або символ будуть втрачені в результаті інтерференції, інформація збережеться в іншій координаті, а це дозволить відновити символ, хоча і з більш низьким рівнем сигнал/шум.

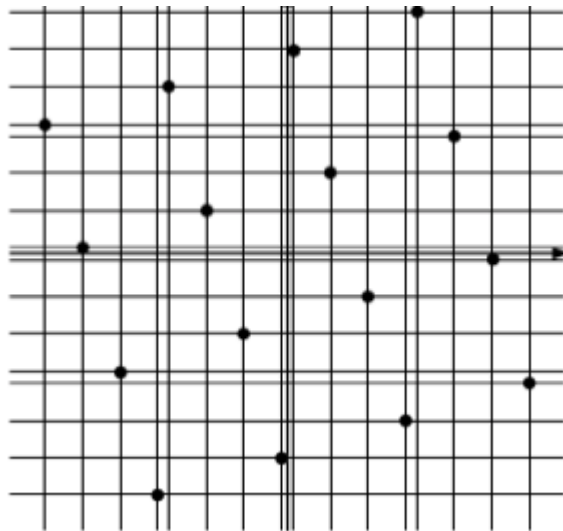


Рисунок 1.3. Сигнальне сузір'я 16-QAM після повороту

Відомо, що дуже часто доводиться робити вибір між якістю переданої інформації та її кількістю. Так, і в мережах ефірного цифрового телевізійного мовлення вибір параметрів передачі тісно пов'язаний з вибором оптимального відношення між завадостійкістю і пропускнуою здатністю системи. Для цього

можна провести порівняльний аналіз даних параметрів в системах DVB-T і DVB-T2.

Необхідно порівняти швидкості передачі при фіксованому відношенні сигнал/шум. Розглянемо режими з максимальною швидкістю передачі даних [2]. Для стандарту DVB-T: 8k, 1/32, 64-QAM, для стандарту DVB-T2: 32k, 1/128, 256 QAM (таблиця 1.2).

Залежності коефіцієнта бітових помилок від відношення сигнал/шум з урахуванням та без урахування кодування з низькою щільністю перевірки на парність LDPC показана на рис. 1.4.

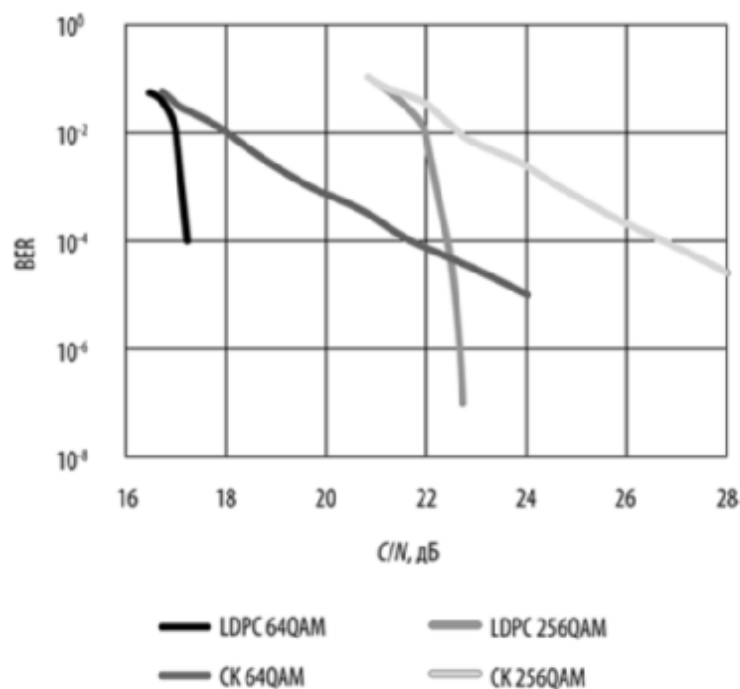


Рисунок 1.4. Залежності коефіцієнта бітових помилок (BER) від відношення сигнал/шум

З таблиці 1.3 очевидно, що при рівному відношенню сигнал/шум швидкість передачі в стандарті DVB-T2 в порівнянні з попередником збільшується на 40-50%. Це означає, що при тому ж радіусі зони покриття кількість переданих програм можна збільшити на 50-60%.

Таблиця 1.3. Порівняння швидкості передачі для однакового відношення сигнал/шум

DVB-T			DVB-T2		
Швидкість кодування	Відношення сигнал/шум, дБ	Швидкість передачі, Мбіт/с	Швидкість кодування	Відношення сигнал/шум, дБ	Швидкість передачі, Мбіт/с
3/4	18,6	27,14	2/3	18,4	40,23
5/6	20	30,16	3/4	20,6	45,24
7/8	21,1	31,67	4/5	22	48,27

Тобто можна зробити висновок, що при однакових параметрах передачі 64 QAM, швидкості кодування $\frac{3}{4}$ та захисному інтервалі $\frac{1}{4}$, відношення сигнал шум у стандарті DVB-T складає 18,6 дБ, а у стандарті DVB-T2 - 15,4 дБ. Звідси випливає, що зона вільного прийому при однакових параметрах буде значно розширена при побудові мережі з використанням стандарту DVB-T2.

Таблиця 1.3 представлена для режиму передачі, який дозволяє забезпечити максимальну пропускну здатність системи, яка досягається при найбільшому порядку модуляції та мінімальному захисному інтервалі. При таких умовах максимальна відстань між сусідніми передавачами в одночастотній мережі складатиме 8,4 км. Очевидно, що при проектуванні мережі така відстань виявиться недостатньою.

Якщо в стандарті DVB-T швидкість передачі для різних режимів визначена точно і її значення відображені в таблицях нормативних документів, то для стандарту DVB-T2 такі таблиці наведені тільки для

максимальних швидкостей передачі. У загальному випадку пропускна здатність системи стандарту DVB-T2 залежить від наступних параметрів: кількості піднесучих, типу модуляції, параметрів кодів LDPC і БЧХ, тривалості захисного інтервалу, обраної схеми пілот-сигналів, використання режиму PLP або multiPLP і деяких інших.

Правильний підбір комбінації всіх описаних параметрів дозволить мінімізувати втрати в заданій зоні покриття, оптимізувати значення потужностей передавачів, пропускну здатність і стійкість системи (рис. 1.5).

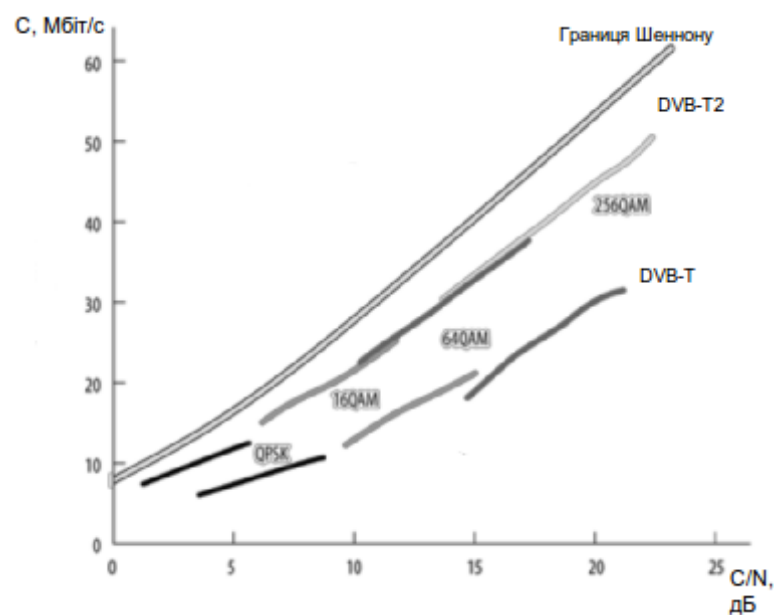


Рисунок 1.5. Максимальна пропускна здатність систем DVB-T і DVB-T2

Характеристики стандарту DVB-T2 наближаються до границі Шеннона, тому подальше підвищення завадостійкості і збільшення пропускної здатності навряд чи можливо в рамках існуючої моделі цифрового ефірного телевізійного мовлення. Малоімовірно, що в найближчому майбутньому з'явиться стандарт ефірного телебачення третього покоління сімейства DVB. Швидше буде розроблена принципово нова модель ефірного цифрового мовлення, а це є складним завданням, що вимагає значних витрат. Тому впровадження стандарту DVB-T2 для другого і наступних мультиплексів є виправданим та актуальним.

1.4 Цілі та постановка задачі роботи

Метою дослідження роботи є виявлення тих особливостей стандарту телевізійного мовлення DVB-T2, які можна запозичити для використання у дуплексній лінії зв'язку, та надати пропозиції щодо підвищення її продуктивності при передачі мультисервісної інформації.

Згідно мети роботи, основними задачами є:

1. Дослідити телевізійний стандарт ефірного мовлення DVB-T2, його особливості та нововведення.
2. З'ясувати актуальність дослідження використання стандарту DVB-T2 та запропонувати використання особливостей стандарту у високошвидкісній дуплексній лінії зв'язку.
3. Обґрунтувати вибір типу телекомунікаційної мультисервісної дуплексної системи (МСДС) з використанням перетворень стандарту DVB-T2 та показники функціонування телекомунікаційної системи, зокрема, її продуктивності.
4. Дослідити стандарт DVB-T2 для використання його перетворень в МСДС. Обрати модель розрахунку та розрахувати для розповсюдження сигналу та затухання.
5. Дослідити основні показники продуктивності мережі за допомогою обраної моделі втрат. Розглянути вплив процедур обробки інформаційних потоків і сигналів на продуктивність МСДС.
6. Оцінити доцільність вдосконалення процедур обробки інформаційних потоків та сигналів задля підвищення продуктивності МСДС.
7. Надати пропозиції щодо підвищення продуктивності МСДС при передачі мультисервісної інформації.

Об'єктом дослідження роботи є дослідження впливу перетворень інформації, які використовуються в DVB-T2, на продуктивність ліній зв'язку.

Предметом дослідження є використання сигнально-кодових перетворень в дуплексній високошвидкісній лінії зв'язку.

Висновки до розділу 1

1. За підсумками першого розділу визначено мету дослідження, а саме: виявлення тих особливостей стандарту телевізійного мовлення DVB-T2, які можна запозичити для використання у дуплексній лінії зв'язку, та надати пропозиції щодо підвищення її продуктивності при передачі мультисервісної інформації.

2. Визначено об'єкт дослідження роботи, а саме: дослідження впливу перетворень інформації, які використовуються в DVB-T2, на продуктивність ліній зв'язку.

3. Відповідно до об'єкту дослідження, предметом дослідження визначено використання сигнально-кодових перетворень в дуплексній високошвидкісній лінії зв'язку.

4. З'ясовано актуальність дослідження використання стандарту DVB-T2 і його головні особливості, серед яких використання потужних видів кодування Боуза-Чоудхурі-Хоквінгема та LDPC (код з малою щільністю перевірок на парність), додавання нового режиму модуляції 256QAM, скремблювання та перемеження даних, обертання сигнального сузір'я, що дозволяє поліпшити завадостійкість системи.

5. Порівняно відмінності стандарту першого та другого покоління, DVB-T та DVB-T2 відповідно, за такими критеріями як види кодування, модуляцій, за швидкостями передачі даних. Наприклад, максимальна швидкість передачі при відношенні сигнал/шум 20 дБ складає 31,7 Мбіт/с для DVB-T та 45,5 Мбіт/с DVB-T2.

6. Обрано тип мультисервісної дуплексної системи - мобільний зв'язок, яка здатна реагувати на зміні в каналі та передавати різні за походженням мультисервісні дані.

7. Обґрунтовано показники функціонування мультисервісної телекомунікаційної системи, зокрема, пропускна здатність – максимальна швидкість передачі інформації при заданих енергетичних характеристиках каналу зв'язку, та продуктивність – фактична швидкість передачі інформації.

2. АНАЛІЗ СТАНДАРТУ DVB-T2 ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ ЙОГО ПЕРЕТВОРЕНЬ В МСДС

2.1 Аналіз процедур обробки МС інформаційних потоків у стандарті DVB-T2

Потреби користувачів в галузі інформаційних систем ростуть з кожним роком, разом з цим ускладнюється процес управління та обслуговування цих систем. Саме цей фактор вимагає інтеграції тих додатків, які раніше існували окремо.

Мультисервісні мережі, насамперед, забезпечують роботу різних інформаційних, телекомунікаційних систем і додатків в єдиному транспортному середовищі, коли для передачі звичайного трафіку (даних) і трафіку іншої інформації (мови, відео та ін.) використовується єдина інфраструктура.

Оскільки мультисервісна мережа передачі даних використовує спільний канал для передачі даних різних типів, це дозволяє зменшити використання різнорідних типів обладнання, а, отже, застосовувати єдині стандарти, технології і централізовано керувати комунікаційним середовищем.

Однією з переваг МС являється швидкісна передача даних тому, що на великі відстані дані передаються без істотної втрати пакетів, а, отже, і без втрати якості даних для користувачів.

Телевізійний стандарт мовлення DVB-T2 являється потужним інструментом мультисервісного мовлення, в який закладено величезні можливості по розширенню функціоналу.

Відомо, що в стандарті DVB-T2 можлива передача декількох різних та незалежних за своєю природою і структурою транспортних потоків. Кожен цифровий потік поміщається в один магістральний потік, іншими словами - канал фізичного рівня PLP (англ. Physical Layer Pipe) (рис. 2.1). Це дозволяє

забезпечувати різну стійкість до помилок для різних послуг. У кожному каналі PLP можуть використовуватися свої модуляція, швидкість коду і перемеження. Для всіх каналів PLP використовується одна частота, тому всі вони вважаються одним каналом DVB-T2.

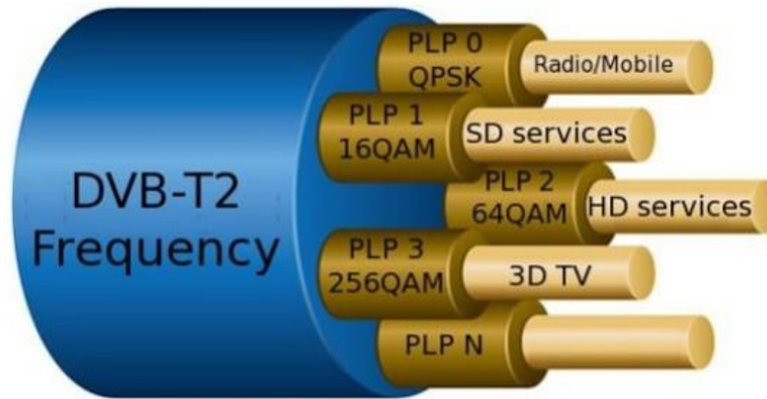


Рисунок 2.1. Концепція PLP

У стандарті розрізняються чотири типу потоків [16]:

- транспортний потік (Transport Stream - TS),
- узагальнений інкапсульований потік (Generic Encapsulated Stream - GSE),
- узагальнений безперервний потік (Generic Continuous Stream - GCS),
- узагальнений потік, об'єднаний в пакети фіксованої довжини (Generic Fixed-length Packetized Stream - GFPS).

Кожен потік являє собою послідовність користувальницьких пакетів (UP - User Packet).

Транспортний потік - це послідовність пакетів фіксованої довжини, де пакети MPEG-2 розміром 188 байт, перший байт - завжди синхробайт зі значенням 4716. MPEG-2 являє собою назву групи стандартів цифрового кодування відео- і аудіо сигналів, організації транспортних потоків відео і аудіо інформації.

Потік GSE характеризується пакетами змінної або фіксованої довжини, яка вказується в заголовках цих пакетів.

Потік GCS являє собою безперервний потік бітів. В реальному каналі передачі цей потік представляє собою або послідовність пакетів без вказівки їх довжини, або пакети максимально можливої довжини 64 Кбіт.

Потік GFPS – це формат для сумісності з DVB-S2, який може бути замінений на GSE.

Відомо, що DVB-T2 дозволяє надавати різні цифрові сервіси та послуги, що підтверджує його мультисервісність потоків, серед них: багатоканальне мультиплексування, телебачення стандартної чіткості SDTV в форматах співвідношення сторін екрану 4:3 і 16:9, телебачення високої чіткості HDTV, телебачення надвисокої чіткості UHDTV, 3D-телебачення в стандарті DVB 3D-TV, інтерактивне гібридне телебачення в стандарті HbbTV, відео за запитом, телетекст, субтитри, стереозвук, цифрове радіо та інші.

2.2 Пропозиції щодо доцільності використання процедур обробки інформації стандарту DVB-T2 у МСДС

Оскільки мультиплексований сигнал DVB-T2 може містити один канал PLP (режим А) або кілька каналів M-PLP (режим В системи T2), то концепція PLP допускає використання широкого набору передачі різних медіа у реальному житті. З передавальної сторони можна легко диференціювати послуги на основі PLP, розрізняючи пропозиції в залежності від рівня стійкості до помилок.

Один із можливих сценаріїв - використання різних схем модуляції для підтримки широкого набору класів Quality of Service (QoS) для кожного PLP [17]. Такий сценарій дозволяє, наприклад, організувати канал PLP високошвидкісної передачі даних для прийому тривимірного контенту або контенту високої чіткості антеною, яка встановлена на даху, другий канал

PLP, виділений для прийому контенту стандартної чіткості в приміщеннях, і третій канал PLP з високою стійкістю до помилок для прийому мобільного ТБ або радіоприймання.

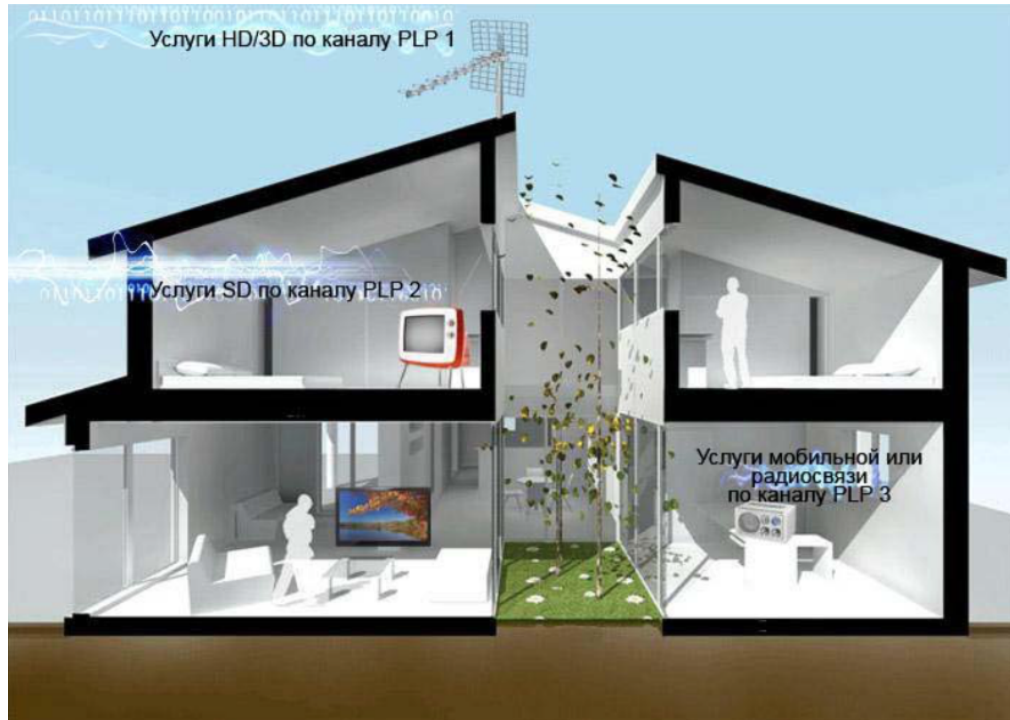


Рисунок 2.2. Сценарій з класами QoS

Тоді для цього сценарію можемо записати нижче наведену конфігурацію.

В цьому прикладі показані відмінності на 12 дБ значенні сигнал/шум (S/N) між першими двома каналами для того, щоб забезпечити можливість мобільного прийому. Часовий перемежувач, який несе за собою виправляючу здатність з урахуванням перевірконої комбінації, забезпечує додаткову стійкість до помилок для мобільного прийому послуг [7].

Таблиця 2.1. Параметри для передачі різних типів даних у PLP каналах

Загальні параметри: канал 8 МГц, захисний інтервал 1/4						
PLP	Контент	Прийом	Модуляція	Швидкість коду	Швидкість передачі даних	S/N
1	HD/3D	Антенна на даху	256 QAM	3/4	18,6 Мбіт/с	23 Дб
2	SD	Внутрішня антена	16 QAM	3/5	4 Мбіт/с	11 Дб
3	Мобільне ТВ або радіозв'язок	Мобільний прийом	QPSK	1/2	0,5 Мбіт/с	3 Дб

Можливе використання різних конфігурацій, але в даному сценарії показані різні показники стійкості до помилок і швидкості передачі, які можна досягти при застосуванні конфігурації M-PLP в одному каналі DVB-T2. Необхідно також відмітити, що постачальники контенту повинні повторно мультиплексувати весь контент для створення одного потоку PLP. У цьому випадку вони не мають повного контролю над переданим мультисервісним потоком.

Використовуючи можливості PLP, виділенням певної частини смуги пропускання кожному постачальнику контенту можна управляти на рівні PLP, щоб гарантувати таке виділення. Цей метод дозволяє зробити операторів незалежними один від одного при використанні вибору параметрів мережі (вид модуляції, швидкість коду і т.д.).

Незважаючи на широке впровадження цифрових відеоінформаційних систем, процес розробки більш ефективних алгоритмів стиснення візуальної та звукової інформації та їх передачі по каналах з різною пропускною

здатністю продовжується. Оскільки наявні стандарти визначають лише цифровий потік кодованих даних і не регламентують принципи його формування, є можливість більш ефективної обробки сигналів в рамках цих стандартів [11].

Щодо доцільності використання процедур обробки інформації у даному випадку можна зробити висновок, що у мережі DVB-T2 головним типом потоку являється транспортний потік, адже він дозволяє передавати у собі всі типи мультисервісних даних спираючись на потреби користувача. Особливості транспортного потоку MPEG полягають у позначенні його MPEG-TS (Transport Stream), а, отже, використанні стандарту MPEG. MPEG відноситься до групи стандартів цифрового кодування відео- і аудіосигналів, організації транспортних потоків відео і аудіо інформації, передачі супутньої інформації.

MPEG-2 як представник стандарту спочатку замислювався як система компресії для телевізійного мовлення при порівняно невеликих швидкостях потоків даних. Але можливості алгоритмів, закладених в його основу, виявилися настільки значними, що MPEG-2 поглинув сферу телебачення високої чіткості. Здібності стандарту MPEG-2 пристосовуватися до різних швидкостей потоку даних, рівнями якості і сферам застосування надзвичайно великі. Головною особливістю MPEG-2 являється його гнучкість.

Стандарт MPEG-2 складається з трьох основних частин: системної, відео та звукової. Відеочастина стандарту описує кодований бітовий потік для високоякісного цифрового відео. MPEG-2 є сумісним розширенням MPEG-1, він підтримує міжрядковий формат відео і ряд розвинених засобів.

Звукова частина стандарту MPEG-2 визначає низькошвидкісне кодування багатоканального звуку. MPEG-2 підтримує до 5 повних широкосмугових каналів плюс додатковий низькочастотний канал і/або до семи багатоязичних коментаторських каналів. Він також розширює можливості кодування моно і стереозвукового сигналів в MPEG-1.

Звуковий стандарт багатоканального кодування забезпечує сумісність з MPEG-1. У ньому розглядаються також до трьох несумісних кодеків.

Системна частина стандарту MPEG-2 описує формати мультимплексування звукової, відео та іншої інформації, розглядає питання комбінування одного або більше потоків даних в один або безліч потоків, придатних для зберігання або передачі.

Системне кодування відповідно до синтаксичних і семантичних правил, що накладаються цим стандартом, забезпечує необхідну і достатню інформацію, щоб синхронізувати декодування без переповнення або недоповнення буферів декодера при різних умовах прийому або відновлення потоків [20].

Транспортний потік призначений для передачі або зберігання однієї або більше програм кодованих даних і інших даних в середовищах, де можуть виникнути істотні помилки. Такі помилки можуть проявлятися як бітові помилки або втрата пакетів.

Транспортний потік спроектований таким чином, що деякі з операцій над транспортним потоком можливі з мінімальними витратами. Серед них:

- виділення кодованих даних однієї програми в транспортному потоці, їх декодування і представлення результату;
- витяг транспортних пакетів однієї програми з транспортних потоків і організація іншого транспортного потоку з цієї однієї програмою;
- витяг транспортних пакетів однієї або більше програм з одного або декількох транспортних потоків і організація іншого транспортного потоку;
- витяг змісту однієї програми з транспортного потоку і організація програмного потоку, що містить цю одну програму.

Тому MPEG-2 в порівнянні з іншими системами компресії, гідний того, щоб стати універсальним стандартом обміну мультисервісними потоками даних в інфраструктурі телебачення майбутнього, а, отже, й у DVB-T2.

Пропозиції щодо доцільності використання процедур обробки сигналу у стандарті DVB-T2 детально описуються у останньому 4 розділі роботи, а

саме пропозиції щодо редукції деяких параметрів сигнально-кодових конструкцій (СКК), що використовуються у стандарті. Для цього необхідно визначити які саме показники СКК можна відсіяти, та за якими параметрами робити оцінку системи.

Всі необхідні показники системи можна розрахувати за рахунок використання просторової моделі Окамура-Хати, моделі Уолша-Ікегамі або інших.

Створені на сьогоднішній день моделі розрахунку зони покриття в радіомережах відрізняються за складністю (за кількістю показників, які вони враховують) і умовно діляться на три групи (рис. 2.3).



Рисунок 2.3. Класифікація методів розрахунку зони покриття

Детерміновані і комбіновані моделі не отримали широкого застосування так як не можуть врахувати абсолютно всі фактори, що впливають на сигнал, а розрахунки виявляються занадто складними. Хоча статистичні моделі не позбавлені недоліків (однорідність структури моделі, низька точність, необхідність використовувати моделі не окремо, а кілька моделей в комплексі при великому розкиді значень змінних), вони найбільш активно використовуються для проведення розрахунків через простоту розрахунків [33].

До статистичних моделей розрахунку втрат радіосигналу відносяться моделі Кся-Бертоні, Окамура-Хата, Уолша-Ікегамі, Лі та інші. Всі ці моделі

базуються на експериментальних дослідженнях напруженості електромагнітного поля.

Задля проведення розрахунків за допомогою однієї з методик необхідно визначитися лише з однією моделлю розповсюдження сигналу. Порівняння проводиться між трьома медиками, а саме: Окамури-Хата, Лі та Уолша-Ікегамі.

Таблиця 2.2. Таблиця порівняння моделей

Модель	Діапазон частот	Вхідні дані	Обмеження
Окамури-Хата	150 - 1000 МГц	h_B, h_M, d коефіцієнти для типу місцевості	h_B : 30-200 м, h_M : 1-10 м, d : 1-20 км
Лі	До 2 ГГц	d, h	-
Уолша-Ікегамі	1,5- 2 ГГц	h_B, h_M, d коефіцієнти для типу місцевості	h_B :30 - 200 м, h_M :1 - 10 м, d : 1- 20 км

Найпростішою моделлю для обчислення втрат потужності радіосигналу є модель вільного простору. Рівняння для визначення втрат може бути записано в двох формах:

- лінійною (L_p разів):

$$L_p = \frac{\lambda^2}{4\pi d^2}, \quad (2.1)$$

де λ - довжина хвилі сигналу, а d - відстань між передавачем і приймачем;

- і логарифмічною:

$$L_p = -36,4 - 20 \log(f) - 20 \log(d), \quad (2.2)$$

де f - частота сигналу в мегагерцах, d - відстань у кілометрах.

При заданій несучій в формулі 2.1 довжина хвилі, а в формулі 2.2 перші два доданка - константи, і виходить, що втрати при поширенні сигналу в обох випадках залежать тільки від відстані між базовою і мобільною станціями.

Даний метод розрахунку в системах мобільного зв'язку не використовується, тому що розрахункові значення вірні тільки для вільного простору (наприклад, для космосу), проте дозволяє зрозуміти, як впливає зміна характеру місцевості на радіус дії базової станції мобільного зв'язку в порівнянні з вільним простором.

Модель Лі використовується у наземному зв'язку, лінія якого супроводжується великими втратами, за рахунок неоднорідності ландшафту між передавачем і приймачем. Результативний прийнятий сигнал складається з сигналів, що переміщуються через прямі і непрямі шляхи. Тому ступінь втрат на трасі залежить від відстані між передавачем і приймачем (базовою і мобільною станцією).

Модель Окамура-Хата і Уолша-Ікегамі являються статистичними моделями, які базуються на результатах численних експериментів по дослідженню напруженості електромагнітного поля. Першою історично була модель Окамура-Хати. Спочатку емпірична модель Окамура ґрунтувалася на вимірах, проведених в декількох районах Токіо і представляла собою набір кривих для різних частот в різних місцевостях. Через 12 років М. Хата апроксимував криві поширення математичним виразом. Ця формула охоплювала тільки діапазон частот від 150 до 1000 МГц. Але, як відомо, зв'язок GSM використовує смугу частот в районі 1800 МГц, і до даної смуги частот ця модель непридатна [34].

Тому пізніше Ікегамі були розраховані поправочні коефіцієнти спеціально для частот від 1500 до 2000 МГц і ця модель отримала назву Уолша-Ікегамі. Модель Уолша-Ікегамі визнана найкращою для передбачення рівня сигналу в малих зонах. Ця модель заснована на фізичному поданні поля в точці прийому у вигляді двох складових: когерентної і розсіяною. Когерентна складова визначається хвилею, дифрагує навколо будівель вздовж дороги з боку БС. Розсіяний ж компонент створює хвилі, які утворюються в результаті перевипромінювання будівлями падаючої на них хвилі від БС. Розсіяний компонент приходить з напрямків, які не збігаються з

напрямом на БС і навіть протилежних цим напрямком. Модель стверджує, що в умовах міста з відносною, але щільною забудовою основним шляхом поширення сигналу (в разі відсутності прямої видимості між вузлами) є шлях, що проходить через дахи будівель (які можуть бути описані як серії послідовних екранів), супроводжуваний багаторазовим розсіюванням.

Дана методика вважається непростотою у обчислюванні через доволі об'ємний розрахунок показників, який включає в себе урахування ширину вулиць, висоту будівель та відстань між будівлями.

Модель Окамура-Хати і Уолша-Ікегами застосовується частіше для розрахунків втрат радіосигналу, і більш того, модель Уолша-Ікегами використовується Міжнародним союзом електрозв'язку.

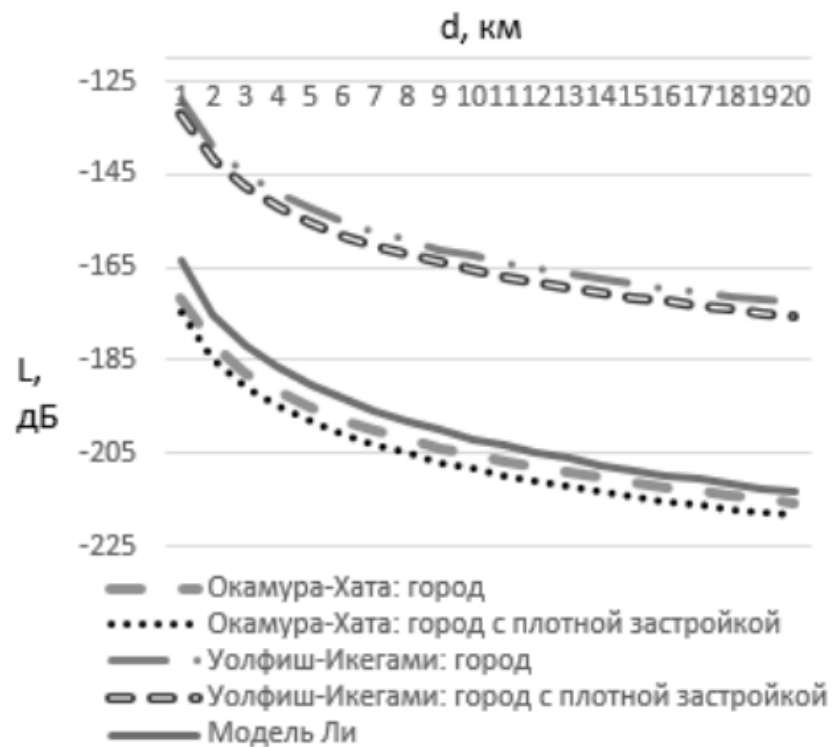


Рисунок 2.4. Графіки втрати потужності сигналу для статистичних моделей

Графік, зображений на рис. 2.4 [33], наочно показує різницю в обчисленнях втрат сигналу за допомогою різних моделей, в нашому випадку моделей Окамури-Хата, Лі та Уолша-Ікегами.

Як видно з рисунка вид графіків ідентичний графіку логарифмічної функції, що дозволяє зробити висновок: рівень сигналу стільникового зв'язку зменшується з відстанню. Рівень сигналу залежить також від будівельних конструкцій і структури ландшафту.

Оскільки модель розрахунку Лі в системах мобільного зв'язку не використовується, а модель Уолша-Ікегамі занадто громіздка і результати у порівнянні з моделлю Окамура-Хата майже збігаються (за даними відомих минулих робіт), то у пункті 4.3 даної роботи розрахунки вестимуться саме за методикою Окамура-Хата.

2.3 Аналіз процесу обробки сигналу у стандарті DVB-T2

На рис. 2.5 зображено загальну схему обробки сигналів, що передаються в системі DVB-T2.



Рисунок 2.5. Загальна схема обробки сигналів, що передаються в системі DVB-T2

У стандарті DVB-T2 пакети об'єднуються в потокові ВВ-кадри (Baseband) (рис. 2.6.). Відомо, що ВВ-кадр містить ВВ-заголовок за розміром 80 біт, поле даних, а також поле вирівнювання. В полі вирівнювання передаються дані внутрішньо-канальної сигналізації. В заголовку пакету, іншими словами BBHEADER, міститься інформація про тип транспортного потоку, розмір інтерфейсу пакета і всього поля даних, наявності режимів видалення порожніх пакетів та додаткових синхропакетів, використовується

постійна/змінна модуляція і т.п. Розмір поля даних і вирівнюючого поля визначається параметрами згорткового кодеру (у сумі не більше 53770 біт).



Рисунок 2.6. Структура ВВ-кадру

На рисунку 2.6 – $K_{БЧХ}$ позначається кількість бітів в блоці, некованому БЧХ.

Після скремблювання ВВ-кадр потрапляє в блок BICM (Bit Interleaved Coding and Modulation).

Ще одна принципова особливість стандарту DVB-T2 це механізм захисного кодування. В якості корегуючого коду використовується каскадний код. В якості зовнішнього коду в ньому застосований блоковий кодер БЧХ. В якості внутрішнього - код з низькою щільністю перевірки на парність (LDPC). Перед модуляцією (крім BPSK і QPSK) кодові слова піддаються побітному перемиженню і розподіляються по модуляційним символам.

Також в DVB-T2 була додана нова модуляція 256-QAM, яка підвищує ємність каналу передачі на 33% у порівнянні з модуляцією 64-QAM в DVB-T. Зазвичай перехід від 64-QAM до 256-QAM вимагає збільшення співвідношення сигнал/шум на 4-5 дБ.

Завдяки застосуванню коригувальних кодів БЧХ та LDPC, ефективність яких набагато вище традиційних кодів виправлення помилок (в т.ч. Ріда-Соломона), DVB-T2 швидкість кодування може бути набагато вище і загальна пропускна здатність каналу суттєво зростає.

До одних з нововведень також відноситься введення схеми модуляції з нахилом сигнального сузір'я у стандарті DVB-T2. Нахил сигнального сузір'я передбачає те, що сформований модуляційний символ повертається в комплексній площині на певний кут, який залежить від числа рівнів модуляції (29° для QPSK, $16,8^\circ$ - для 16-QAM, $8,6^\circ$ для 64-QAM і $\arctg(1/16)$ для 256-QAM). Більше того, перед початком обертання квадратурна (Q) координата кожного маніпуляційного символу циклічно зсувається в рамках одного кодового слова (тобто береться з попереднього символу цього слова, Q-компонента першого символу стає рівною Q-компоненті останнього).

Після того, як модуляційні символи сформовані відбувається їх перемеження в межах кодового слова, а після цього відбувається часове перемеження.

Всі розглянуті досі процедури виконуються паралельно для окремих магістральних потоків. В результаті для кожного PLP формується послідовність модуляційних символів. З них необхідно сформувати OFDM-символи. Але якщо в DVB-T ця процедура була абсолютно прозорою, то в DVB-T2, із-за можливості транслювати декілька мультимедійних потоків, необхідно сформувати досить складну кадрову структуру. Кадр фізичного рівня DVB-T2 (T2-кадр) починається з преамбули P1. Це OFDM-символ з модуляцією DBPSK, двома захисними інтервалами з двох сторін (в сумі $1/2$ тривалості символу). Він служить для синхронізації, ідентифікації потоку DVB-T2, а також містить 7 інформаційних біт з початковою інформацією про T2-кадр, а саме кількість номінальних піднесучих в OFDM (1K-32K) і формат передачі наступної за P1 преамбули P2. Вся інша інформація про T2-кадри (довжина, модуляція, швидкість кодування тощо) передається в преамбулі P2, яка може займати кілька OFDM-символів. Далі йде поле даних (інформаційні OFDM-символи). Замикає T2-кадр спеціальний завершальний OFDM-символ. В залежності від параметрів OFDM, в T2-кадрі може бути від 60 до 2098 OFDM-символів при смузі передачі 8 МГц.

Максимальна тривалість T2-кадру складає 250 мс. В свою чергу, T2-кадри об'єднуються в суперкадри. Крім T2-кадрів в суперкадр ще входять поля, зарезервовані для подальшого використання. Відомо, що вони можуть чергуватися у довільному порядку. Максимальну тривалість суперкадра складає 128 с.

Зазначимо, що плюс до всіх перерахованих видів перемеження на рівні біт в кодових словах, модуляційних символів, часового перемеження - використовується ще й частотне перемеження, тобто перестановка піднесучих в межах OFDM-символу.

У стандарті DVB-T2 зміни торкнулися і структури OFDM-символу. Збільшено можливе число номінальних піднесучих - крім 8K (8×1024) додані режими 1K, 4K, 16K і 32K піднесучих.

Чим більше номінальних піднесучих, тим триваліший може бути OFDM-символ. Це, в свою чергу, дозволяє зменшити захисний інтервал до $1/128$ (проти $1/32$ в DVB-T). Використання такого захисного інтервалу при 32K номінальних піднесучих еквівалентно захисному інтервалу $1/32$ при 8K піднесучих. Однак пропускна здатність при цьому зростає досить істотно. Всього в DVB-T2 дозволено використовувати сім відносних довжин захисних інтервалів - $1/128$, $1/32$, $1/16$, $19/256$, $1/8$, $19/128$ і $1/4$ [25]. У DVB-T2, можливо, і більш гнучкий розподіл пілотних піднесучих. Замість однієї фіксованої схеми розподілу - ділення пілотних частот в DVB-T, DVB-T2 передбачено вісім різних схем їх розподілу. Вибір варіанту залежить від числа номінальних піднесучих і розміру захисного інтервалу. В результаті якщо в DVB-T розподілені пілотні піднесучі становили 8% всіх піднесучих, то в DVB-T2 цей показник може становити також 1, 2 і 4%. Ще одна принципово нова можливість - передача в режимі колі приймач обробляє сигнал від двох передавальних антен з використанням схеми Аламоуті, тобто приймач обробляє сигнал від двох передавальних антен.

Таблиця 2.3. Максимальна швидкість бітового потоку при ширині смуги 8 МГц, 32Л номінальних піднесучих, захисний інтервал 1/128, схема пілотних піднесучих PP7

Модуляція	Швид- кість кодува- ння	Абсолютна максимальна швидкість, Мбіт/с	Довжина T2- кадру, OFDM- символу	Число кодових слів в кадрі
QPSK	1/2	7,49255	62	52
	3/5	9,003747		
	2/3	10,01867		
	3/4	11,27057		
	4/5	12,02614		
	5/6	12,53733		
QAM-16	1/2	15,03743	60	101
	3/5	18,07038		
	2/3	20,10732		
	3/4	22,6198		
	4/5	24,13628		
	5/6	25,16224		
QAM-64	1/2	22,51994	46	116
	3/5	27,06206		
	2/3	30,11257		
	3/4	33,87524		
	4/5	36,1463		
	5/6	37,68277		

Продовження таблиці 2.3

QAM-256	1/2	30,08728	68	229
	3/5	36,15568		
	2/3	40,23124		
	3/4	45,25828		
	4/5	48,29248		
	5/6	50,34524		

Вводяться і додаткові частотні смуги - 10 МГц і 1,712 МГц (остання - для мобільних сервісів). В цілому, всі ці нововведення дозволяють створити дуже гнучку і в той же час надзвичайно ефективну систему трансляції мультимедійних потоків. При цьому максимальна швидкість вхідного транспортного потоку після попередньої обробки (наприклад, видалення нульових пакетів) може перевершувати 50 Мбіт/с (табл. 2.3). Зрозуміло, що зовсім не обов'язково використовувати всі можливості стандарту. У тому числі - і трансляцію безлічі мультимедійних потоків.

2.4 Пропозиції щодо доцільності використання обробки сигналу у стандарті DVB-T2

Доцільність використання досить об'ємного процесу обробки сигналу у стандарті DVB-T2 зводиться до того чи всі ці особливості та процеси необхідні, адже розробники стандарту захищають таким чином сигнал в процесі передачі, щоб він уникав впливу будь-яких видів завмирань, розсіювання сигналу за рахунок багатопроміневості.

Відомо, що одним із найефективніших засобів боротьби з багатопроміневістю являється технологія ортогонального частотного мультиплексування, яка застосовується й у стандарті DVB-T2.

Відомо, що швидкість зміни умов поширення визначає швидкість завмирань. У більшості випадків телевізійний канал зв'язку характеризується

відсутністю прямої видимості між передавачем і приймачем, особливо в умовах щільної міської забудови.

Коли швидкість передачі досить висока застосовується такий метод передачі даних при якому загальний потік розподіляється на декілька частотних підканалів і передача ведеться одночасно паралельно на всіх цих підканалах [36]. При цьому висока швидкість передачі досягається за рахунок передачі даних по всіх каналах одночасно, а швидкість передачі в окремому підканалі цілком може бути невисокою. Оскільки в кожному з частотних підканалів швидкість передачі можна зробити не надто високою, це створює передумови для ефективного придушення міжсимвольної інтерференції.

При частотному поділі каналів необхідно, щоб ширина окремого каналу була, з одного боку, досить вузькою для мінімізації спотворення сигналу в межах окремого каналу, а з іншого - досить широкою для забезпечення необхідної швидкості передачі. Крім того, для економного використання всієї смуги каналу, яка поділяється на підканали, бажано якомога щільніше розташувати частотні підканали, але при цьому уникнути міжканальної інтерференції, щоб забезпечити повну незалежність каналів один від одного. Частотні канали, що задовольняють перерахованим вимогам, називаються ортогональними. Несучі сигнали всіх частотних підканалів (а точніше, функції, що описують ці сигнали) ортогональні один одному. Важливо, що хоча самі частотні підканали можуть частково перекривати один одного, ортогональність несучих сигналів гарантує незалежність каналів один від одного, а отже, і відсутність міжканальної інтерференції [36].

Сигнал в системі з ортогональним частотним мультиплексуванням має розбиття на безліч несучих, що забезпечує невелику кількість символів на одну несучу і знижує міжсимвольну інтерференцію. Додатково застосовується захисний інтервал - циклічний префікс, що додається в початок кожного символу. Для ефективної роботи системи, що використовує

такий підхід, максимальна затримка в каналі не повинна перевищувати довжину циклічного префікса. Висока ефективність систем OFDM при роботі в каналах з багаторазовими відображеннями робить їх придатними для високошвидкісних систем передачі даних в наземних системах зв'язку.

Загальна модель сигналу $S(t)$ на виході передавача системи OFDM виглядає наступним чином [36]:

$$S(t) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m x_m \exp \{j\omega_m t\}, \quad (2.3)$$

де M - число піднесучих, ω_m - частота m -тої піднесучої, x_m - комплексний коефіцієнт каналу, відповідний m -тій піднесучій.

З урахуванням багатопроміневості, вираз для сигналу $y(t)$ на вході приймача системи OFDM має наступний вигляд:

$$y(t) = \sum_{q=0}^Q \lambda_q S(t - \tau_q) + \eta(t), \quad (2.4)$$

де Q - кількість променів, λ_q - комплексний коефіцієнт каналу, відповідний q - му променю, τ_q - затримка, відповідний q - му променю, $\eta(t)$ - шум спостереження, який є комплексним гаусовським випадковим процесом з нульовим середнім і рівномірною спектральною щільністю.

Підставляючи (2.3) в (2.4) отримаємо:

$$y(t) = \sum_{m=0}^{M-1} g_m x_m e^{j\omega_m t} + \eta(t), \quad (2.5)$$

$$\text{де } g_m = A_m \sum_{q=0}^Q \lambda_q e^{-j\omega_m \tau_q}.$$

Комплексні величини g_m мають сенс комплексних амплітуд піднесучих на вході приймача системи OFDM. Після дискретизації рівняння (2.5) може бути переписано в такій формі:

$$y_n = \sum_{m=0}^{M-1} g_m x_m e^{j\omega_m n T_0} + \eta_n, n = 1, \dots, N, \quad (2.6)$$

де $y_n = y(nT_0)$ - відлік сигналу на вході приймача, $\eta_n = \eta(nT_0)$ - некорельована комплексна послідовність відліків шуму спостереження з нульовим середнім і дисперсією $2\sigma^2$, T_0 - період дискретизації; N - число тимчасових відліків.

Рівняння 2.6 являє собою модель сигналу на вході приймача системи OFDM з урахуванням багатопроменевого поширення радіохвиль.

Висновки до розділу 2

1. Детально розглянуто типи інформаційних потоків у стандарті DVB-T2 та їх обробка, а саме: транспортний потік, узагальнений інкапсульований потік, узагальнений безперервний потік та узагальнений потік, об'єднаний в пакети фіксованої довжини.

2. Розглянуто типи сервісів для передачі, що підтримує стандарт DVB-T2, серед них: багатоканальне мультиплексування, телебачення стандартної чіткості SDTV в форматах співвідношення сторін екрану 4:3 і 16:9, телебачення високої чіткості HDTV, телебачення надвисокої чіткості UHD TV, 3D-телебачення в стандарті DVB 3D-TV, інтерактивне гібридне телебачення в стандарті HbbTV, відео за запитом, телетекст, субтитри, стереозвук, цифрове радіо та інші.

3. Проаналізовано основні процедури обробки інформації та нововведення стандарту, а саме, використання одного фізичного каналу PLP для декількох логічних каналів, особливості передачі одного з головних типів потоку – транспортного потоку.

4. Проведено порівняння моделей розрахунку втрат та лінії, таких як Окамура-Хата, модель Лі та Уолша-Ікегамі за критеріями діапазону частот, типами вхідних даних, щільності забудови на місцевості та складності розрахунків. За результатами порівняння обрано модель Окамура-Хата.

5. Досліджено формування та передача кадрів у стандарті, де пакети об'єднуються в потокові ВВ-кадри у кожного з якого міститься свій заголовок розміром 80 біт, поле даних та поле вирівнювання. Також зроблено висновок, що завдяки застосуванню коригувальних кодів БЧХ та LDPC, ефективність яких набагато вище традиційних кодів виправлення помилок (в т.ч. Ріда-Соломона), у стандарті DVB-T2 швидкість кодування може бути набагато вище і загальна пропускна здатність каналу суттєво зростає.

6. Обґрунтовано доцільність використання об'ємного процесу обробки сигналу для передачі його у каналі та зроблено висновок, що чи всі ці особливості та процеси необхідні, адже розробники стандарту захищають таким чином сигнал в процесі передачі, щоб він уникав впливу будь-яких видів замирань, розсіювання сигналу за рахунок багатопроміневості.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ ВИБРАНОЇ МСДС ПРИ ВИКОРИСТАННІ СТАНДАРТУ DVB-T2

3.1 Особливості визначення показників продуктивності в МСДС

Продуктивність телекомунікаційної мережі залежить від численних факторів, таких як середовище передачі даних, частота радіохвиль, розміщення пристроїв і їх конфігурація. При використанні пристроїв стандарту DVB-T2 вкрай важливо зрозуміти, які саме вдосконалення були реалізовані в цьому стандарті, на що вони впливають.

Продуктивність мережі представляє собою таку характеристику системи, яка визначає реальну допустиму швидкість передачі інформації у каналі.

Якість передачі інформації можна визначити за показниками пропускної здатності каналу, продуктивності та відстані переданої інформації. Як впливає з однієї відомої формули для пропускної здатності C з використанням маніпуляції заданої кратності M :

$$C = V \cdot [\log M - p_{\text{ош}} \log \frac{p_{\text{ош}}}{M-1} - (1 - p_{\text{ош}}) \cdot \log(1 - p_{\text{ош}})], \quad (3.1)$$

де M – це позиційність сигналу.

З одного боку, пропускна здатність збільшується по мірі зростання швидкості передачі символів V в каналі, з іншого боку, її зростання обмежене збільшенням вірогідності помилки з прискоренням передачі V . Одночасно, ймовірність помилки тим більше, чим більше кратність маніпуляції M [25].

Таким чином, якщо завчасно відомі значення ймовірності символної помилки багатопозиційного сигналу, можна визначити пропускну здатність при заданому виді маніпуляції.

Продуктивність можна визначити за формулою:

$$R_1 = V \cdot [1 + (1 - p_{\text{ош}}) \cdot \log_2(1 - p_{\text{ош}}) + p_{\text{ош}} \cdot \log_2 p_{\text{ош}}], \quad (3.2)$$

Цей параметр обмежений швидкістю та залежить від ймовірності помилки. Ця продуктивність являється продуктивністю одного каналу, а загальна складається з N продуктивностей як:

$$R_{\text{заг}} = R_1 \log_2 M, \quad (3.3)$$

Отже, для точного визначення ймовірності помилкового прийому символів багатопозиційної маніпуляції необхідно оцінити пропускну здатність каналу зв'язку, а для точного визначення бітової ймовірності помилки треба оцінити продуктивність. Ці параметри дуже тісно пов'язані з відстанню поширення інформації.

В технічній літературі приводяться різні співвідношення для розрахунку ймовірності помилки маніпульованих сигналів ($P_{\text{сим}}$) і помилки інформаційного символу ($P_{\text{біт}}$).

Як відомо, існує декілька способів розрахунку символьних та бітових помилок, серед них результати векторно-фазового методу та за Дж. Прокісом, необхідно отримати більш точні аналітичні співвідношення для визначення ймовірностей помилок для більш широкого набору маніпуляцій. В даній роботі необхідно провести аналіз згідно набору маніпуляцій вказаних у стандарті DVB-T2, а саме для: QPSK, QAM-16 (Quadrature Amplitude Modulation), QAM-64 та QAM-256.

Дані розрахунки будуть аналітично розраховані та графічно побудовані за векторно-фазовим методом та за допомогою формул Дж. Прокіса.

Оскільки для 64 та 256 позиційних маніпуляцій розрахунки збільшуються в декілька разів, в рамках даної роботи будуть прораховані значення ймовірності помилок лише для QPSK та QAM-16 маніпуляцій.

Для отримання точних результатів використовується векторно-фазовий метод, в основі якого лежить визначення вірогідності попадання

результуючого (сумарного) вектора сигналу й перешкоди в деяку просторово-фазову область, в якій перешкода призводить до неправильного приймання символів багатократної маніпуляції [21].

Нехай в канал зв'язку передається сигнал S . Під впливом перешкоди W сигнал S утворює результуючий сигнал r , який приходить на приймач. Якщо результуючий сигнал потрапляє в область реєстрації сигналу, що передається, то сигнал приймається вірно, якщо ж результуючий сигнал знаходиться поза області достовірної реєстрації сигналу, що передається, то він приймається невірно.

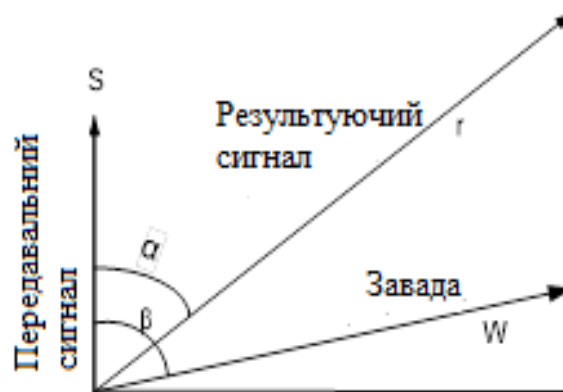


Рисунок 3.1. Векторне представлення впливу перешкоди на результуючий сигнал

Якщо розглядати більш детально маніпуляції, які використовуються у стандарті DVB-T2, то можна відмітити, що QPSK являється ефективнішим видом маніпуляції, ніж BPSK. На відміну від BPSK, кожний сигнал, що передається - передає 2 біти інформації. Вид сигнального простору для QPSK показаний на рис. 3.2. Двійкові цифри в передавачі групуються по дві, і в кожному інтервалі передачі символів дві послідовних цифри визначають, який з чотирьох можливих сигналів здійснить модулятор. Імовірність помилки на вході декодера визначається розташуванням сигнальних точок в ансамблі і шумом в каналі. Сузір'я сигналів QPSK являє собою набір

складається з чотирьох сигнальних точок (S_0 , S_1 , S_2 , S_3), зміщених один відносно одного на 90° і 180° [21].

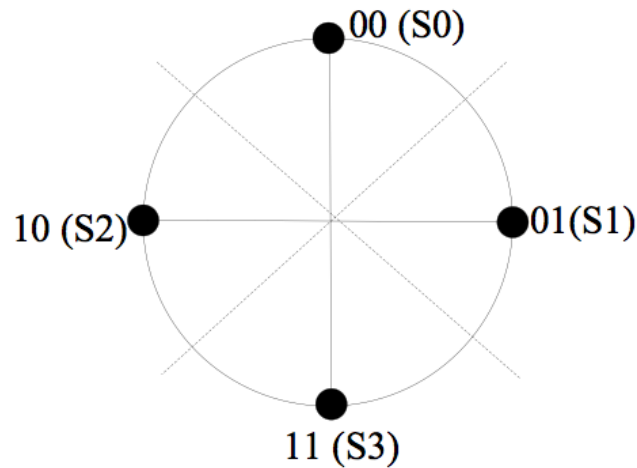


Рисунок 3.2. Сигнальне сузір'я QPSK з використанням кода Грея

Розглянемо випадок розрахунку символної помилки з використанням векторно-фазового методу для QPSK.

Символ S_0 відповідає правильному прийому, це означає, що вектор суми сигналу і перешкоди знаходиться в області переданого сигналу S_0 . Області правильного прийому для кожного сигналу показані штрихпунктирними лініями, що представляють собою промені. Якщо при демодуляції виникне помилка, то прийнятий сигнал з'явиться в області прийому інших 3-х сигналів. Так, при передачі S_0 виникне помилка, якщо приймається сигнал виявиться в областях прийому S_1 , S_2 , S_3 .

Тепер необхідно побудувати векторну діаграму залежності амплітуди перешкоди від її кута, яка призведе до невірному прийому сигналу S_0 , що передається (результуючий вектор суми переданого сигналу і перешкоди потрапить в область прийому сигналів S_1 , S_2 , S_3). Розглянемо вплив вектора перешкоди на сигнал з амплітудою рівною 1. Векторна діаграма амплітуд перешкоди приведена на рис.3.3. Для того, щоб переданий сигнал був прийнятий невірно, необхідно, щоб вектор результуючого сигналу R ,

утвореного вектором переданого сигналу S і вектором перешкоди W , потрапив в область прийому «помилкового» сигналу [21].

Згідно проведених математичних перетворень над векторами, отримуємо таке співвідношення між векторами для QPSK:

$$W(\beta) = \frac{S}{\sin\beta(\operatorname{ctg}\alpha - \operatorname{ctg}\beta)}, \quad (3.4)$$

Умова для QPSK, описує граничний стан, при перевищенні якого переданий сигнал буде прийнятий невірно. Скориставшись вищевказаним умовою, отримуємо граничну умову для вектора перешкоди:

$$W(\beta) = \frac{S}{\sin\beta(\operatorname{ctg}\frac{\pi}{4} - \operatorname{ctg}\beta)}, \quad (3.5)$$

Для визначення ймовірності символної та бітової помилки скористаємося результатами роботи [22]:

$$P_{S_{QPSK}}(h^2) = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \frac{-h^2}{e^{\sin^2\beta(1-\operatorname{ctg}\beta)^2}} d\beta, \quad (3.7)$$

$$P_{b_{QPSK}}(h^2) = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{5\pi}{4}} \frac{h^2}{e^{(\sin\alpha - \cos\alpha)^2}} d\alpha, \quad (3.8)$$

Розрахунок для знаходження ймовірності бітової помилки зводиться до знаходження середньої вірогідності помилки по кожному біту. Тоді якщо помилка виникне в першому інформаційному біті (при передачі "0" в першому каналі з двох), прийнята комбінація буде або "10" або "11".

Модуляції QAM-16, QAM-64 являються багатопозиційними видами, при яких змінюються значення амплітуди та початкової фази кожного канального символу. Отже, в кожному сигналі QAM-16 міститься 4 біти інформації, а в кожному сигналі QAM-64 міститься 6 бітів інформації. Зобразимо сигнальні простори вказаних видів маніпуляції.

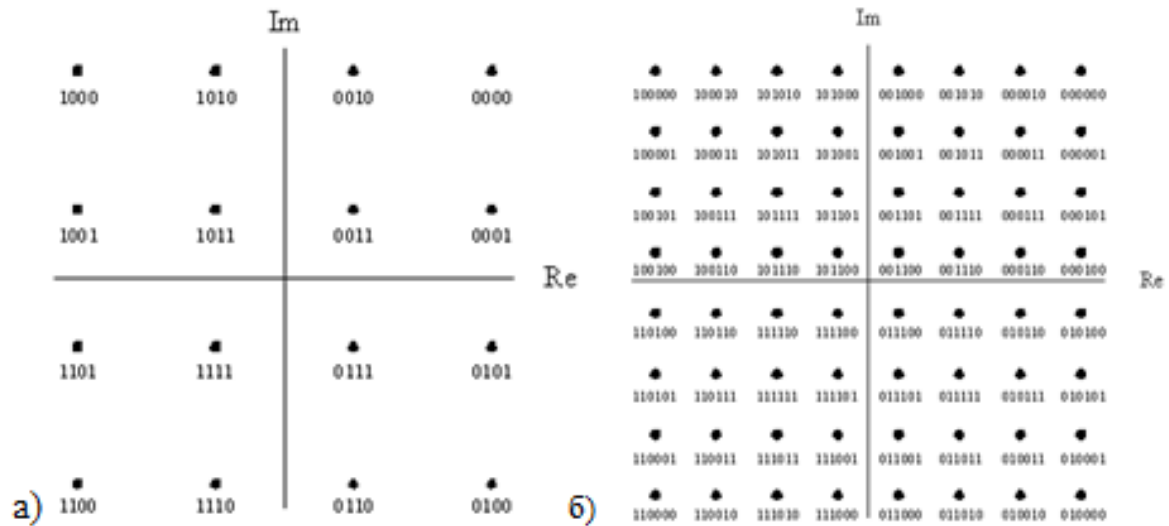


Рисунок 3.3. Зображення сигнальних просторів а) багатопозиційної модуляції QAM-16 та б) QAM-64

Для маніпуляції QAM-16 ймовірність бітової помилки визначається середньою ймовірністю бітової помилки по всіх 4-м бітам. Тоді так само, як середня бітова ймовірність помилки першого біта дорівнює ймовірності помилки для третього біта, бітова ймовірність помилки другого біта буде дорівнювати ймовірності помилки четвертого [26].

Можна дійти висновку, що якщо ймовірність помилок 1 і 3, 2 і 4 біт збігаються, то для знаходження середньої бітової помилки досить буде знайти ймовірності помилок 1 і 2 бітів:

$$P_{б_{QAM16}}(h^2) = \frac{P_{ош_б_1}(h^2) + P_{ош_б_2}(h^2)}{2}, \quad (3.9)$$

де $P_{ош_б_1}(h^2)$ - ймовірність помилки 1-го та 3-го бітів, а $P_{ош_б_2}(h^2)$ - ймовірність помилки 2-го та 4-го бітів.

Ймовірність помилки 1-го біта визначається умовами попадання вектора помилки в область, яка заштрихована на рис. 3.4. Для першого

рисунка для сигналів 0010, 0011, 0001 та 0000, а для другого - для сигналів 0110, 0111, 0101 та 0100.

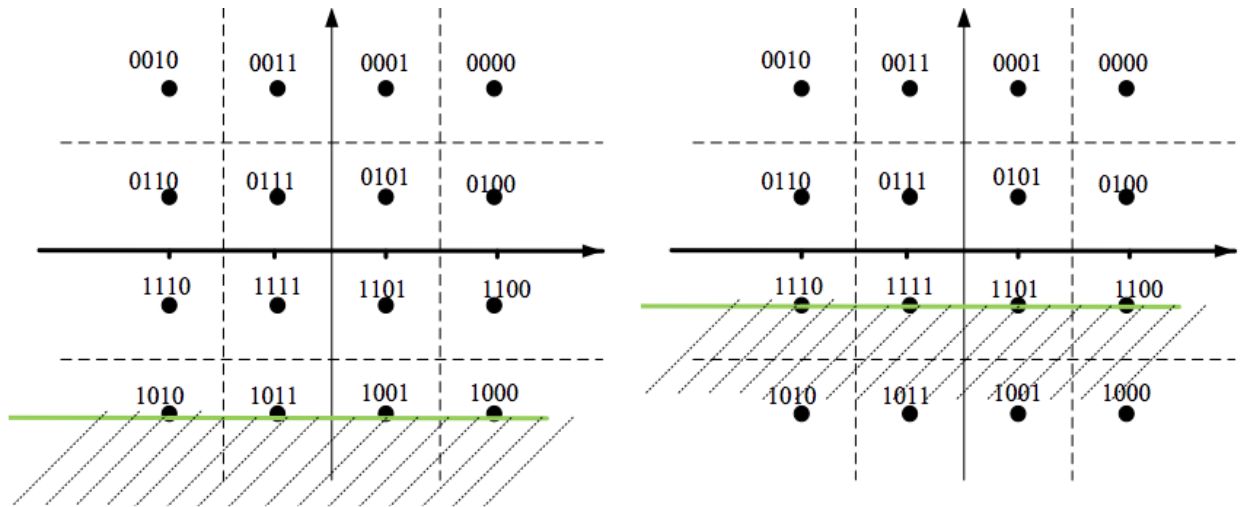


Рисунок 3.4. Області помилки для третього біту сигналу QAM-16

Тоді такі ймовірності будуть розраховуватися за такими формулами:

$$P_{\text{ош}_6_1}(h^2) = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{2(\cos\alpha - \sin\alpha)^2}} d\alpha + \frac{1}{2\pi} \int_{\arctg(3)}^{\pi + \arctg(3)} e^{\frac{-5h^2}{18(\cos\alpha + \frac{\sin\alpha}{3})^2}} d\alpha + \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\sin\alpha - \cos\alpha)^2}} d\alpha}{4}, \quad (3.10).$$

$$P_{\text{ош}_6_2}(h^2) = \frac{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\cos\alpha - \sin\alpha)^2}} d\alpha - \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{50(\cos\alpha - \sin\alpha)^2}} d\alpha + \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{3\pi}{4}}^{\frac{5\pi}{4}} e^{\frac{-h^2}{18(\cos\alpha - \sin\alpha)^2}} d\alpha}{2}, \quad (3.11).$$

Необхідно зауважити, що особливість даних формул полягає у їх достовірності, адже вони більш точно вираховують ймовірності помилок та не піддаються такої ж універсалізації як інші формули розрахунку ймовірності символьних і бітових помилок.

3.2 Дослідження математичних моделей перетворення сигналів МСДС

Для порівняння векторно-фазового методу з деякими іншими відомими формулами, потрібно провести аналіз та зіставити отримати дані. Для цього скористаємося формулами Дж. Прокіса для розрахунку ймовірності помилки символу та біту.

Відомо, що забезпечення ефективності використання обмежених енергетичних та частотних ресурсів являється актуальною задачею в телекомунікаційних системах. З одного боку ми прагнемо більш ефективно використовувати спектр, а з іншого, чим більше кратність маніпуляції, тим більше псується енергетика сигналу [22]. Якщо енергетика погана, то це означає, що відстань зв'язку невелика. Тому дослідження згідно покращення достовірності ми будемо проводити за методикою описаною нижче за Дж.Прокісом.

Вихідними даними для методики є наступні параметри:

n – довжина блока завадостійкого коду;

h^2 – енергетичний параметр, який характеризує відношення середньої енергії сигналу в точці прийому до односторонньої спектральної потужності шуму:

$$h^2 = \frac{E}{N_0} = \frac{P_c}{V_c N_0}, \quad (3.12)$$

де $V_c = \frac{1}{T}$;

α – енергетичний параметр, що дорівнює відношенню потужності корисного сигналу P_c та односторонньої спектральної потужності шуму N_0

$$\alpha = \frac{P_c}{V_c N_0}, \quad (3.13)$$

де V_c - швидкість передачі символів в каналі зв'язку.

Використовуючи ці параметри можна визначити наявну бітову ймовірність помилки в каналі. Вона залежить від способу формування та обробки сигналу.

Для маніпуляції QPSK та QAM-M ймовірність символної та бітової помилок будуть визначатися за формулами:

$$p_{\text{сим}QPSK} = \frac{3}{4} - \frac{1}{2} \Phi(\sqrt{h^2}) - \frac{1}{4} \Phi^2(\sqrt{h^2}), \quad (3.14)$$

- символна ймовірність помилки для сигналу QPSK;

$$p_{\text{біт}QPSK} = \frac{1}{2} \left[1 - \Phi \left(\sqrt{2h^2} \cos \frac{\pi}{4} \right) \right], \quad (3.15)$$

Для сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією справедливі наступні формули:

$$p_{\text{сим}QAM} = 1 - \left(1 - \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\frac{3}{M-1}} h^2}^{\infty} \exp \left(\frac{-u^2}{2} \right) du \right)^2, \quad (3.16)$$

- ймовірність символної помилки;

$$p_{\text{біт}QAM} = \frac{4 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right)}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\frac{3}{M-1}} h^2}^{\infty} \exp \left(\frac{-u^2}{2} \right) du, \quad (3.17)$$

- ймовірність бітової помилки, де M – це позиційність модуляції.

Встановлено, що під час передачі інформації за допомогою багатопозиційних сигналів в каналі виникає символна ймовірність помилки. Символна ймовірність помилки дуже залежить від енергетичних параметрів сигналу. Тобто з покращенням параметру сигнал/шум ймовірність помилки зменшується.

Символьна швидкість передачі повністю визначається використанням типом модуляції, тобто кожен тип модуляції забезпечує певну символьну швидкість. Тим самим, висока щільність потоку даних досягається за рахунок можливості підтримки на великих відстанях в порівнянні з іншими системами високошвидкісних типів модуляцій. На сьогоднішній день QAM є однією з найефективніших методів модуляції, що дозволяє досягати максимально можливих швидкостей передачі даних [26].

За допомогою вище вказаних формул побудовані графіки залежності ймовірності символьної та бітової помилок від енергетичних параметрів каналу зв'язку за векторно-фазовим методом та формулами Дж. Прокіса.

Графіки дослідження символьної помилки та відношення сигнал/шум для кожної модуляції розраховані та побудовані в програмі Mathlab мають наступний вигляд:

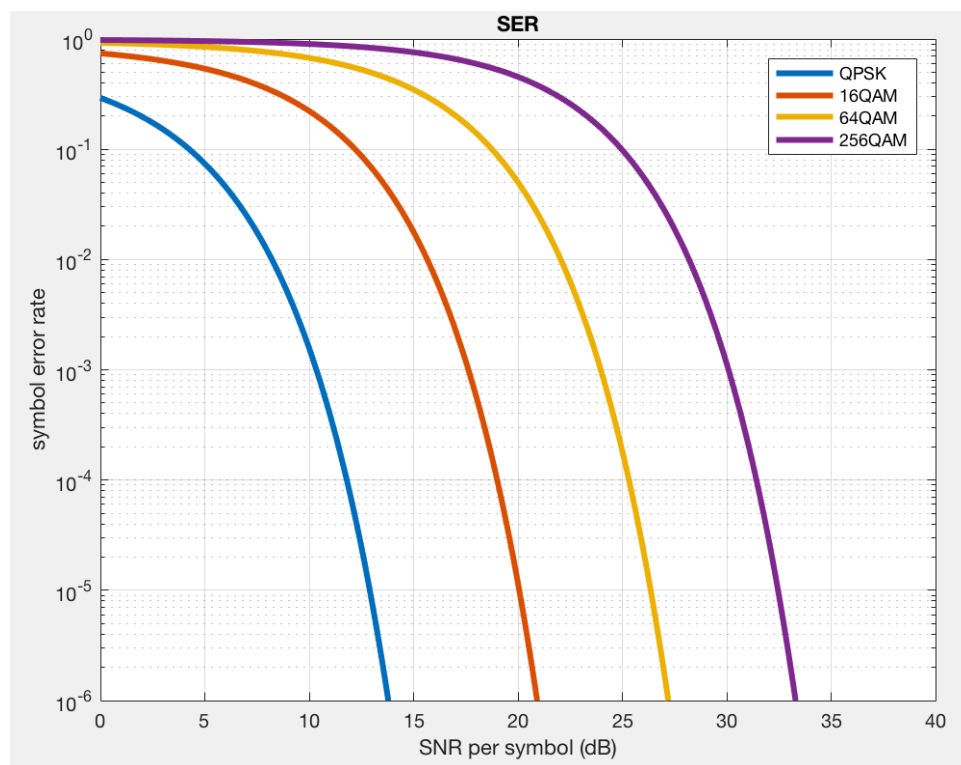


Рисунок 3.5. Графік залежності символічної ймовірності помилок від h^2 для QPSK, QAM-16, QAM-64 та QAM-256

Бітова ймовірність помилок багатопозиційних сигналів для сигналу QPSK менше символної ймовірності помилок, тому що не будь-яке спотворення символу призводить до неправильного прийому байта інформації. Графіки залежності бітової ймовірності помилки від енергетичного параметру h^2 представлена на рис. 3.6.

З представлених залежностей на рис. 3.5-3.6 можна зробити наступні висновки:

- для забезпечення заданої достовірності необхідно виправляти більшу кількість помилок при низькій енергетиці в каналі зв'язку;
- в каналах з більшою позиційністю виникає більша кількість помилок у порівнянні з каналами з меншою позиційністю, це можна пояснити меншою завадостійкістю останніх [26].

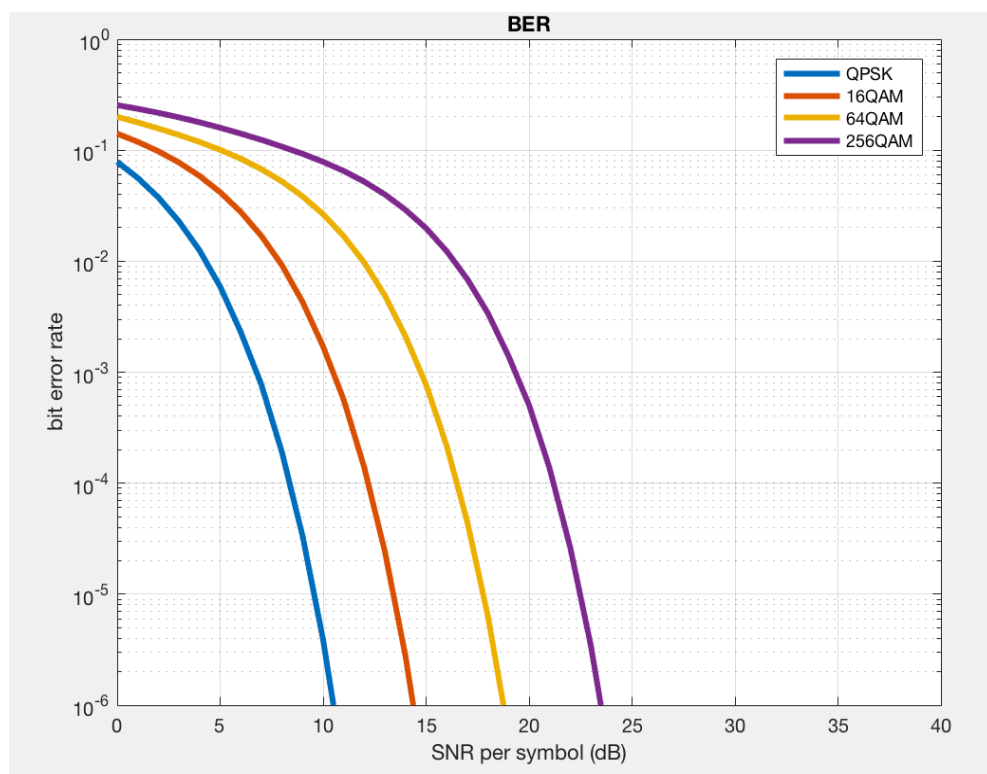


Рисунок 3.6. Графік залежності бітової ймовірності помилок від h^2 для QPSK, QAM-16, QAM-64 та QAM-256

Аналітично розраховані значення пропускної здатності каналу зв'язку для різних видів багатопозиційної модуляції на рис. 3.6. [23].

Можна зробити висновок, що згідно рис.3.6, доцільно використовувати наступні види модуляції за критерієм максимальної пропускної здатності в залежності від відношення енергії сигналу до спектральної потужності шуму в точці прийому (табл.3.1) [24]:

Таблиця 3.1. Граничні значення відношення сигнал/шум для вибраних оптимальних видів багатопозиційної модуляції

№	Відношення сигнал/шум, разів	Оптимальний вид багатопозиційної модуляції за критерієм пропускної здатності
1.	$0 < h^2 < 7,7$	QPSK
2.	$7,7 < h^2 < 47$	QAM-16
3.	$47 < h^2 < 100$	QAM-64

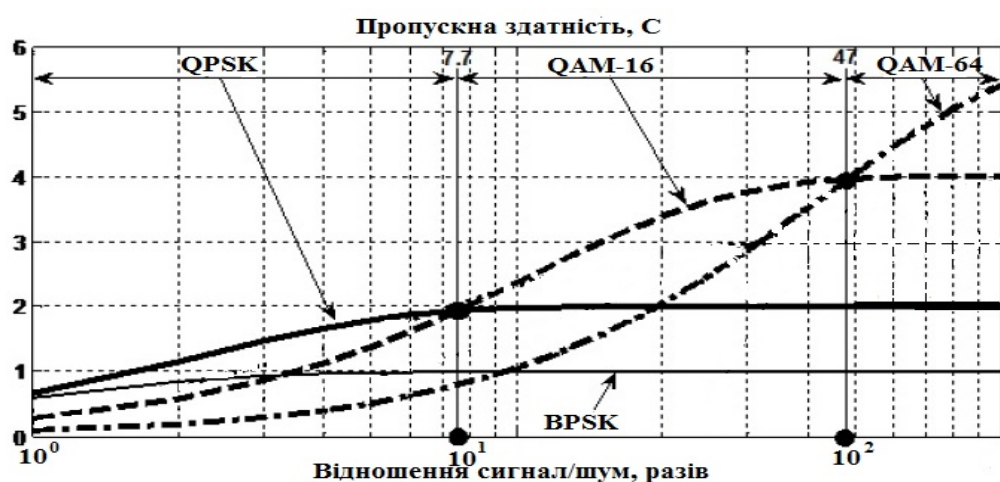


Рисунок 3.7. Залежність пропускної здатності каналу зв'язку від відношення рівня сигналу до рівня шуму для різних видів багатопозиційної модуляції

3.3 Аналіз впливу процедур обробки сигналів на продуктивність МСДС

Одним з аспектів дослідження інформаційних можливостей потоків МСДС є визначення просторових характеристик зони обслуговування. Оскільки відомо, що різні системи зв'язку по різному використовують основний ресурс, що відводиться для передачі повідомлень, тому завершальним етапом досліджень є дослідження ефективності системи передачі даних.

В сучасному світі обсяги інформації неухильно зростають, а це означає, що її необхідно постійно обробляти й зберігати. Але крім проблеми зростаючих інформаційних ресурсів збільшуються і вимоги до переміщення цих ресурсів з більшою швидкістю і на великі відстані, для більшого числа споживачів. Саме тому, одним з аспектів дослідження інформаційних можливостей каналі зв'язку є визначення характеристик просторових зон обслуговування з урахуванням типових видів перетворення.

Надання послуг зв'язку має бути забезпечено встановленими швидкостями передачі даних і необхідною якістю. Критерієм властивості в цьому випадку представляє достовірність прийнятої інформації, що чисельно проявляється ймовірністю помилкового прийому біта. Достовірність в каналах зв'язку – це характеристика правильної передачі інформації, що обумовлена у відповідності з критеріями достовірності [25]. Вона залежить від критеріїв вірогідності (залежність середньої вірогідності помилки на біт від відношення сигнал/шум $P_{\text{ош}}^- = f\left(\frac{E_c}{N_0}\right)$, де E_c – енергія сигналу, N_0 – спектральна щільність шуму), енергетичних критеріїв (відношення сигнал/шум за потужністю, енергетичне відношення сигнал/шум), смуги частот, умов поширення інформації та інших аспектів. Головна задача достовірності в мінімізації помилок $P_{\text{ош}}^- \rightarrow \min$.

Достовірність вимірюють вірогідністю помилки прийому біта інформації або частотою помилкових біт, як пишуть закордонні джерела (Bit Error Rate – BER).

Відомо, що забезпечення ефективності використання обмежених енергетичних та частотний ресурсів являється актуальною задачею в телекомунікаційних системах. З одного боку ми прагнемо більш ефективно використовувати спектр, а з іншого, чим більше кратність маніпуляції, тим більше псується енергетика сигналу [22]. Якщо енергетика досить погана, то це означає, що відстань на яку можливо передати сигнал зменшується. Тому дослідження згідно покращення достовірності ми будемо проводити за методиками описаними нижче.

Для передавання сервісу більш високої якості необхідно використовувати більш високі види кратності модуляцій, але збільшення позиційності модуляції призводить як до збільшення продуктивності, так водночас до погіршення достовірності, адже застосування завадостійкого кодування дозволяє забезпечити необхідну достовірність. В стандарті DVB-T2 використовуються потужні LDPC коди та коди БЧХ з високою швидкістю виправлення помилок.

Достовірність інформації, що передається, являється однією з найважливіших характеристик, що визначає якість інформаційного обміну, та є одним з показників якості обслуговування.

Обраним способом для забезпечення зростання продуктивності каналів зв'язку при обмеженому частотно-енергетичному ресурсі, являється застосування багатопозійних сигналів. При тому покращення пропускної здатності каналу супроводжується зниженням в ньому показників достовірності.

Згідно розрахунків з минулих розділів роботи побудована така порівняльна таблиця (табл. 3.2.), згідно якої можна зробити висновок щодо точності аналітичних співвідношень для визначення ймовірностей помилок для більш широкого набору маніпуляції за формулами Дж. Прокіса та векторно-фазовим методом [22].

Таблиця 3.2. Порівняння отриманих значень бітової та символної ймовірності помилок за різними методами обчислення

Модуляція	Відношення сигнал/ шум (h ²)	Векторно-фазовий метод		За Дж. Прокісом	
		P _b	P _c	P _b	P _c
QPSK	0	0,28	0,7	0,26	0,97
	1	$1 \cdot 10^{-2}$	0,58	0,13	0,9
	4	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$
	5	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
	8	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$
	10	-	-	-	10^{-11}
QAM-16	1	0,52	0,76	0,49	0,98
	5	0,16	0,38	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-2}$
	7	$2 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
	10	$5,1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
	13	$3 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-9}$	$9,1 \cdot 10^{-9}$
	15	$1 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$2,9 \cdot 10^{-11}$
QAM-64	1	-	-	0,72	0,97

Продовження таблиці 3.2.

	5	-	-	0,24	0,41
	10	-	-	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$4,4 \cdot 10^{-2}$
	15	-	-	$9,3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	20	-	-	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
	25	-	-	$4,2 \cdot 10^{-8}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$
	30	-	-	$5,1 \cdot 10^{-11}$	$8,8 \cdot 10^{-11}$

Порівняння результатів показало, що існує збіг між результатами до певної границі векторно-фазового методу визначення ймовірності помилок та за формулами Дж. Прокіса. Різниця між розрахунками все ж таки існує, адже метод за Дж. Прокісом досить непоганий, але формули вченого досить точні лише до деякої границі h^2 , і тому чим більше кратність модуляції, тим більше аналітичне розходження.

Тобто можна дійти висновку, що для невеликих значеннях відношення сигнал/шум значення співпадають, але при збільшенні кратності модуляції розходження становиться більш помітним. Будемо рахувати, що при відношення сигнал/шум до 5 дБ значення приблизно однакові, але далі суттєво починають відрізнятися.

Отже, при зміні енергетичних показників умови передачі змінюються. І отже, в залежності від енергетичних умов системі необхідно на це реагувати, на чому акцентовано увагу у 4 розділі.

Висновки до розділу 3

1. У третьому розділі визначено основні показники продуктивності в МСДС, таких як середовище передачі даних, частота радіохвиль, розміщення пристроїв і їх конфігурація.

2. Докладно розглянуті види модуляцій QPSK, 16-QAM, 64-QAM та 256-QAM, що використані при технічній побудові стандарту DVB-T2. Досліджено основні показники та їх вплив на достовірність.

3. Встановлено, що під час передачі інформації за допомогою багатопозиційних сигналів в каналі виникає символна ймовірність помилки. Тому аналітично розраховані методи розрахунку ймовірностей символних та бітових помилок, серед них результати векторно-фазового методу та за Дж. Прокісом.

4. Складено таблицю порівнянь отриманих значень та зроблено аналіз даних методів розрахунку. Порівняння результатів показало, що існує збіг між результатами до певної границі векторно-фазового методу визначення ймовірності помилок та за формулами Дж. Прокіса. Різниця між розрахунками все ж таки існує, адже метод за Дж. Прокісом досить непоганий, але формули вченого досить точні лише до деякої границі h^2 , і тому, чим більше кратність модуляції, тим більше аналітичне розходження.

Будемо рахувати, що при відношення сигнал/шум до 5 дБ значення приблизно однакові, але більш високих відношеннях сигнал/шум значення суттєво починають відрізнятися.

5. Проаналізовано вплив процедур обробки сигналів на достовірність сигналу та зроблено висновок, що для її покращення необхідно використовувати завадостійке кодування, що дозволяє виявляти та виправляти помилки.

6. Завданням наступного розділу є аналіз способів підвищення продуктивності МСДС та методика її розрахунку.

4. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ МСДС ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПЕРЕТВОРЕНЬ СТАНДАРТУ DVB-T2

4.1 Аналіз способів підвищення продуктивності МСДС

Під продуктивністю каналу зв'язку розуміють ту кількість інформації, яку можливо передати по каналу в реальних умовах за деякий проміжок часу. На продуктивність впливає не лише потужність завад та швидкість передачі сигналу, але й перетворення сигналу, що, насамперед, спрямовані на підтримку достовірності передачі сигналу і на підвищення ефективності використання ресурсів.

Оскільки продуктивність залежить прямопорційно від швидкості формування символів, то її збільшення призводить до задоволення потреб користувачів, адже головна умова - це передати за короткий час великий об'єм інформації.

Необхідно враховувати, що збільшення швидкості можливе лише до тих пір, поки продуктивність не досягне максимального значення. На рис. 4.1 можна побачити зміну продуктивності при збільшенні швидкості передачі символів для багатократної модуляції QPSK, QAM-16 та QAM-64 [27].

В роботі способом надалі для підвищення продуктивності каналів зв'язку при обмеженому частотно-енергетичному ресурсі є застосування багатопозиційних сигналів. При цьому поліпшення пропускної здатності каналу зв'язку супроводжується зниженням в ньому показників достовірності.

Задовольнити суперечливі вимоги до продуктивності та достовірності каналів радіозв'язку, без зниження енергетичної ефективності, допомагає інструмент СКК, що представляє собою безліч сигнальних послідовностей, отриманих на основі завадостійких кодів і ансамблів сигналів з щільністю укладання.

СКК протягом останніх кількох років є об'єктом інтенсивного теоретичного дослідження. У той же час дані конструкції швидко знаходять практичне застосування в реальних системах зв'язку. Причина такого пильного інтересу теоретиків і практиків до цих конструкцій - необхідність одночасного підвищення і надійності, і швидкості передачі при істотних обмеженнях на енергетику і займану смугу частот. Це підвищення може бути досягнуто за рахунок вдосконалення методів передачі і прийому (демодуляції і декодування) сигналів, що в свою чергу вимагає створення ускладнених в логічному і кількісному відношенні прийомних і передавальних пристроїв.

Сучасний розвиток електроніки дозволяє істотно ускладнювати пристрій в логічному відношенні; також можливі великі, але обмежені кількісні ускладнення.

У сигнально-кодових конструкціях використовують багатопозиційні сигнали для забезпечення високої швидкості передачі, а надлишкове кодування - для забезпечення необхідної завадостійкості.

Найкраще поєднання багатопозиційною маніпуляції і завадостійкого кодування забезпечують ефективне використання ресурсу каналу зв'язку [22].

При побудові СКК найважливішою є проблема узгодження систем модуляції і кодування, при якій забезпечується висока швидкість передачі сигналу і одночасно висока стійкість. Завдання пошуку найкращої СКК є однією з найбільш складних завдань при побудові мереж зв'язку.

Поєднання багатопозиційної модуляції і завадостійкого кодування дозволяє економно використовувати ресурси каналу зв'язку, поряд з досягненням високих швидкостей передачі інформації, завдяки багатопозиційній модуляції і забезпечення необхідної достовірності в результаті застосування завадостійкого кодування.

Дослідження властивостей СКК є актуальним завданням, оскільки практично всі сучасні бездротові системи передачі використовують набори СКК для передачі інформації.

Розроблені СКК ще не гарантують завадостійкої роботи лінії зв'язку. Для цього потрібен оптимальний алгоритм прийому. Будь-які алгоритми декодування СКК складаються з алгоритмів прийому ансамблю сигналів (внутрішнього декодування) і певної послідовності декодування зовнішніми коригуючими кодами. Основним завданням цього розділу є синтез СКК, які б забезпечували необхідну ймовірність бітової помилки, при заданих параметрах каналу.

В головній частині роботи основним критерієм вибору найкращого поєднання СКК буде інформаційний показник - продуктивність. При однакових витрачаються ресурсах - частотному і енергетичному, буде вибиратися оптимальний набір маніпуляції і блочного коду, для забезпечення максимальної продуктивності.

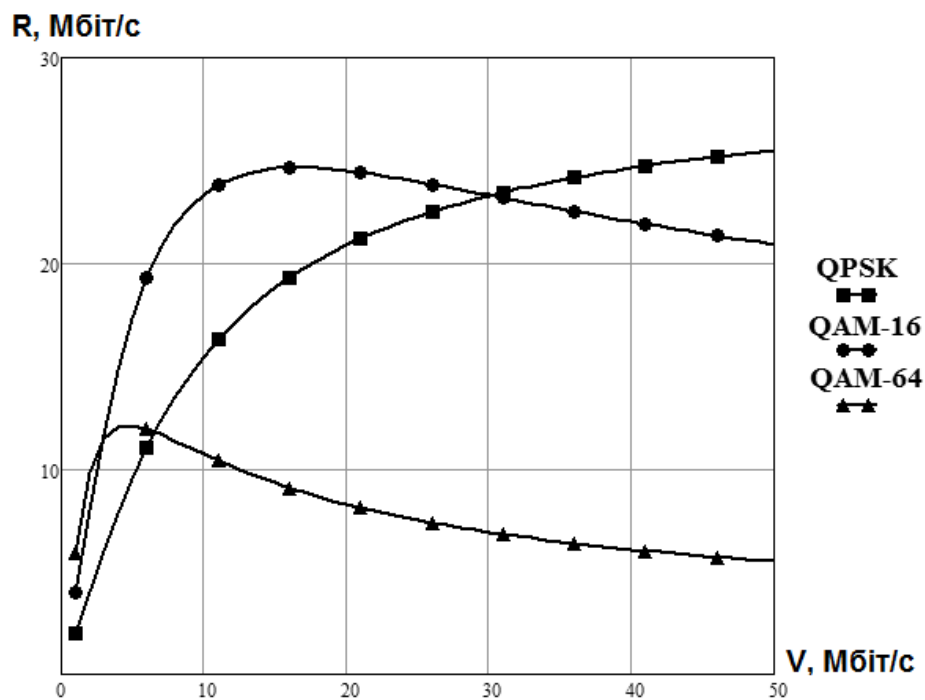


Рисунок 4.1. Залежність продуктивності від швидкості передачі символів

Очевидно, що продуктивність залежить від h^2 енергетичного параметру, що характеризує відношення середньої енергії сигналу в точці

прийому до односторонньої спектральної потужності білого шуму. Залежність для багатократних модуляцій побудована на рис. 4.2.

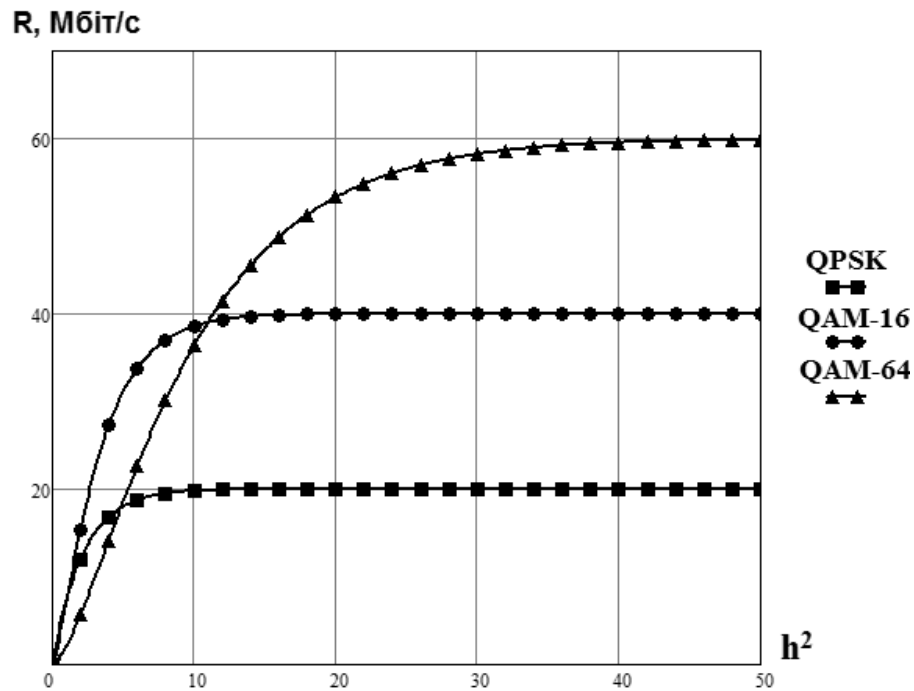


Рисунок 4.2. Залежність енергетичного параметру h^2 від продуктивності сигналу

Продуктивність каналу зв'язку можна підвищити шляхом використання завадостійких кодів при певних ресурсах каналу та заданих вимог до достовірності.

4.2 Методика розрахунку продуктивності системи з урахуванням особливостей стандарту DVB-T2

Удосконалення способів передачі і значне збільшення обсягів інформації, а також застосування нових технічних засобів висувають підвищені вимоги до інформаційних систем в цілому і, зокрема, до систем зв'язку, що являються їх матеріальною основою і відповідають безпосередньо за процес доставки інформації.

Аналіз існуючих підходів до оцінки ефективності цифрових мереж зв'язку та інформаційно-обчислювальних систем показує їх обмеженість з обліку можливостей зберігання інформації в системі, по знаходженню ступеня близькості до граничних характеристик передачі інформації і щодо визначення оптимальних умов функціонування мережі.

В загальному випадку результат роботи системи зв'язку визначається кількістю і якістю інформації, що передається. Кількість оцінюється швидкістю передачі інформації по каналу, а якість - величиною помилки. Згідно теореми К. Шеннона, помилка при відповідному виборі методу передачі (модуляції/кодування) може бути досить малою.

У той же час, швидкість передачі не може бути вище деякого інформаційного ресурсу, званої пропускною спроможністю каналу [29]. В роботі А.Г. Зюко було запропоновано вважати одним з показників ефективності системи величину середньої швидкості, при якій забезпечується задана достовірність передачі інформації.

Методика розрахунку продуктивності зводиться до розрахунку показника інформаційної ефективності, який був запропонований Зюко А.Г. [25]:

$$\eta = \frac{R}{C_H}, \quad (4.1)$$

де R - продуктивність каналу зв'язку, а C_H - пропускна здатність неперервного каналу зв'язку і знаходиться за формулою:

$$C_H = \Delta F \log_2(1 + h^2), \quad (4.2)$$

де ΔF - полоса частот.

Переписавши вираз 4.1 і замінивши $\Delta F = V_C$ отримаємо наступну формулу:

$$\eta = \frac{r_c m [1 + P \log P + (1 - P) \log (1 - P)]}{[\log M + p \log p + (1 - p) \log (1 - p)]} \quad (4.3)$$

де P – ймовірність помилки на виході декодера, p – канална ймовірність помилки, r_c – кодова швидкість.

Формула 4.3 відображає відношення кількості інформації після кодування до кількості інформації до кодування в одному символі [25].

Дану формулу можна привести до більш простішої:

$$\eta = \frac{r_c m}{\log_2(1 + h^2)} \quad (4.4)$$

Найефективніша комбінація коду і сигналу буде вважатися такою, в якій добуток кодової швидкості r_c та коефіцієнту модуляції m та буде максимальним.

В реальних умовах показник η завжди менше одиниці. Чим ближче η до одиниці, тим більш досконалою система передачі інформації.

Досить великий внесок у результуючу інформаційну ефективність вносить множник $r_c m$. З одного боку, модуляція з більшою позиційністю дозволяє передавати більше інформації у тій ж самій полосі частот ΔF , а з іншого боку, зменшує необхідну достовірність інформації та призводить до застосування більш потужного завадостійкого коду.

Безперечно, що вибір оптимальної СКК залежить від відношення сигнал/шум в каналі зв'язку. Виходячи з цього задамося робочим діапазоном відношення сигнал/шум $[h^2_{min}, h^2_{max}]$ для оцінки інформаційної ефективності на вході демодулятора і для кожного набору СКК визначимо, для якого значення h^2 інформаційна ефективність буде найбільша.

Нехай необхідно забезпечити достовірність на виході декодера на рівні $p = 10^{-6}$.

Для побудови графіка відповідності шкали відношення сигнал/шум до інформаційної ефективності дані були запозичені з роботи [25], а саме було визначено канальна ймовірність помилки для кожного виду модуляції.

Далі для кожної ймовірності помилки було визначено швидкість r_c існуючого завадостійкого коду. Тоді для кожного відношення сигнал/шум визначається добуток кодової швидкості та інформаційної ємності m .

Наступним етапом визначаються точки перетину продуктивності і градацій швидкості кодування.

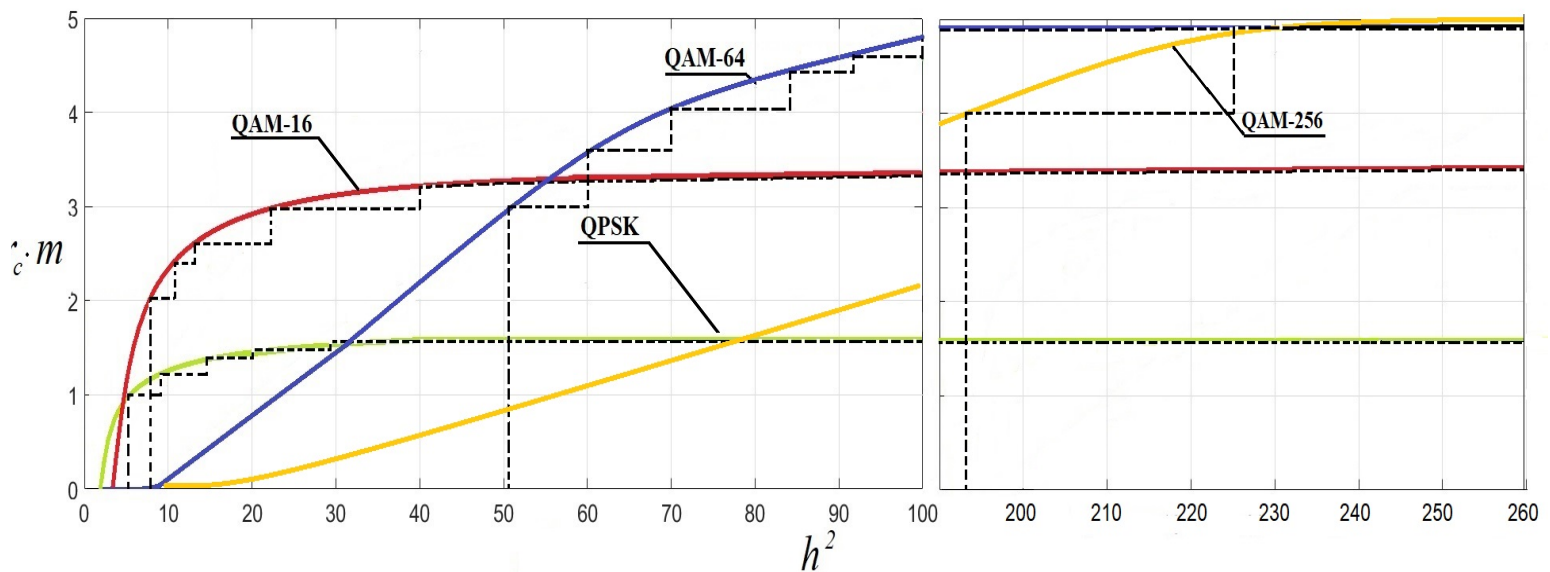


Рисунок 4.3. Графік залежності добутку кодової швидкості завадостійкого коду та інформаційної ємності сигнальної конструкції ($r_c m$) від енергетики h^2

Для кожного значення добутку кодової швидкості та інформаційної ємності модуляцій QPSK, QAM-16, QAM-64 та QAM-256 відповідає окрема сходинка градацій швидкостей завадостійкого коду на рис. 4.3, а саме: $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$. Цим сходинкам відповідають точки переключення видів модуляції.

Доцільно дійти висновку, що варто переходити до сигналів з більшою кратністю модуляцій та застосовувати відповідні швидкості коду, враховуючи факт збільшення енергетики при певних порогових відношеннях сигнал/шум.

У наступному розділі за допомогою моделі Окамура-Хата для розрахунку втрат при розповсюдженні радіосигналу визначається ряд необхідних для функціонування системи параметрів, таких як дальність розповсюдження сигналу, продуктивність системи з використанням всіх градацій кодування у стандарті DVB-T2, а також досліджується доцільність використання всього набору СКК у системі та відібраних згідно аналітичних досліджень.

4.3 Розрахунок продуктивності системи з урахуванням особливостей стандарту DVB-T2

Ринок радіозв'язку в останні роки значно збільшився, і його зростання очікується і в подальшому. Це призвело до того, що багато постачальників послуг зв'язку почали дослідження в області поширення радіохвиль в ситуації щільної міської забудови і в гірській пересіченій місцевості, з метою задоволення зростаючих вимог якісного зв'язку.

Якість зв'язку залежить від багатьох параметрів, таких як посилення передавальної і приймаючої антен, потужності передавача, і коефіцієнта шуму приймача. Всі ці параметри знаходяться під контролем проектувальника системи і можуть бути змінені, щоб оптимізувати систему [34].

Один параметр, однак, не перебуває під контролем проектувальника системи. Цей параметр - втрати поширення або втрати на трасі.

Існуючі методи розрахунку поля в реальних умовах зв'язку сильно відрізняються за підходом, складності та точності. Більшість засноване на використанні експериментальних даних для району, що обслуговується.

Розрахунок затухання сигналу, продуктивності системи, зміни ймовірності помилок біту від відстані, дальності зон розповсюдження модуляцій та інші показники проводяться за допомогою використання

просторової моделі Окамура-Хата за параметрами стандарту DVB-T2 для мультисервісної дуплексної системи.

Затухання сигналу згідно моделі Окамура-Хата розраховується за наступною формулою:

$$L_{okamura}(d) = L_0(d) + A(f, d) - G(h_{BS}) - G(h_{MS}) - G_{area}, \quad (4.5)$$

де d - дальність розповсюдження сигналу (км), $L_0(d)$ - затухання сигналу у вільному просторі, $A(f, d)$ - затухання в місті відносно затухання у вільному просторі за висоти антени базової станції $h_{BS} = 50$ м й висоти антени мобільної станції $h_{MS} = 1.6$ м, $G(h_{BS})$ - коефіцієнт підсилення БС (дБ), $G(h_{MS})$ - коефіцієнт підсилення МС (дБ), G_{area} - фактор затухання для різних типів місцевості.

В (4.6) величина $L_0(d)$ розраховується, а всі інші визначаються за графіками, побудованими на підставі експериментальних даних.

Коефіцієнти підсилення висот станцій визначаються таким чином:

$$G(h_{BS}) = 20 \cdot \log\left(\frac{h_{BS}}{200}\right), \text{ при } 100 > h_{BS} > 10, \quad (4.6)$$

$$G(h_{MS}) = 10 \cdot \log\left(\frac{h_{MS}}{3}\right), \text{ при } 3 > h_{MS}, \quad (4.7)$$

$$G(h_{MS}) = 20 \cdot \log\left(\frac{h_{MS}}{3}\right), \text{ при } 10 > h_{MS}, \quad (4.8)$$

Затухання у вільному просторі розраховується за формулою (4.9):

$$L_0(d) = 32,4 + 20 \cdot \log(F \cdot d), \quad (4.9)$$

де d задається діапазоном від 1 до 10 км, а F розраховується як $F = \frac{f}{10^6}$ і діапазон частот $f = 3$ ГГц.

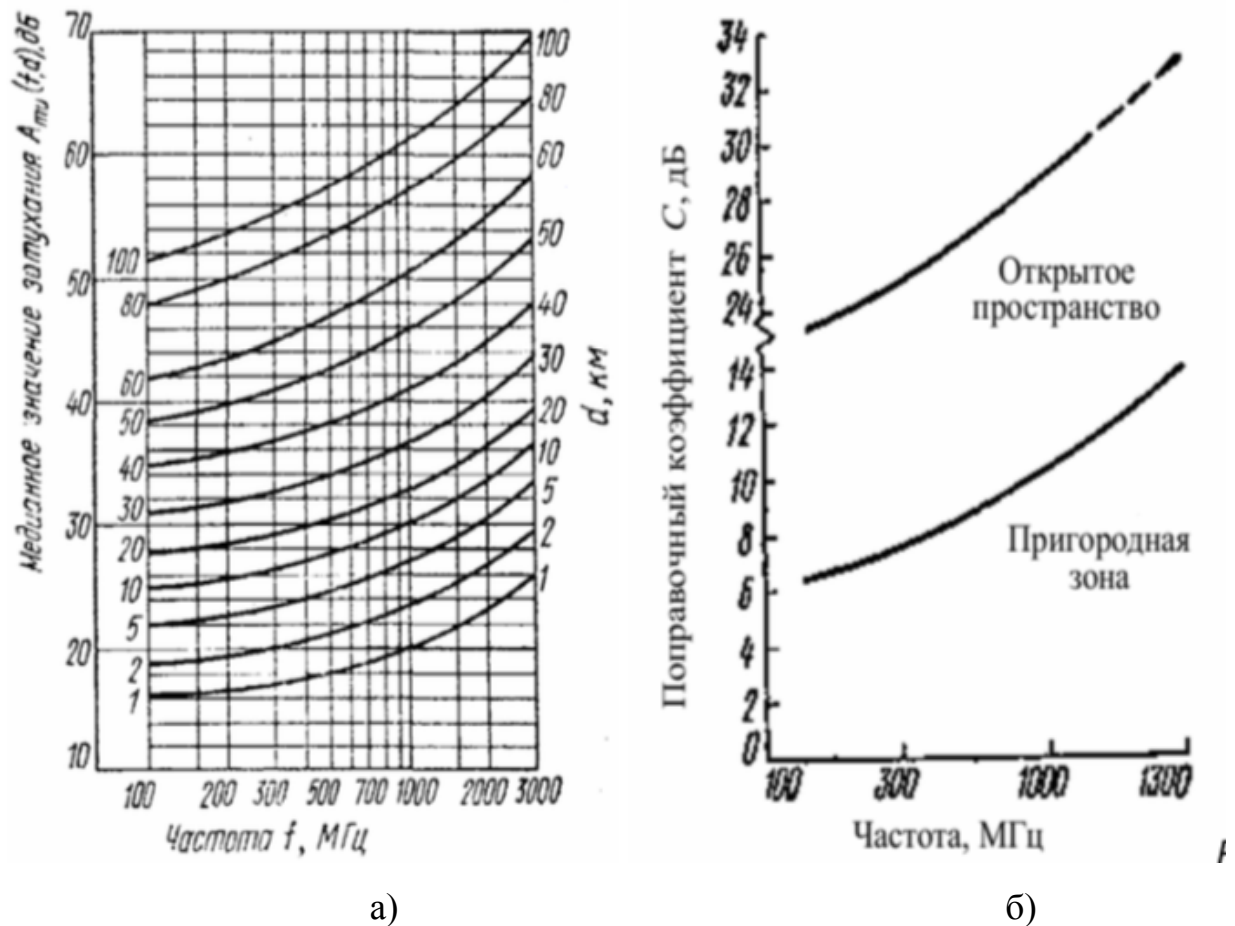


Рисунок 4.4. а) Залежність затухання в місті відносно затухання у вільному просторі від частоти сигналу й відстані за $h_{BS}=200$ м і $h_{MS} = 3$ м ; б) Залежність фактора затухання G_{area} від частоти сигналу і типу місцевості

За отриманими значеннями для заданої дальності від 1 до 10 км необхідно побудувати таблицю 4.1 зі значеннями затухання для моделі розповсюдження Окамури-Хата.

Загасання по моделі Окамури при мінімальній розрахованій дальності 1 км склало 141 дБ, а максимальної в 10 км - 172 дБ.

Застосування моделі розповсюдження Хата дозволяє більш точно оцінити загасання сигналу, в тому числі врахувати щільну забудову міської зони. З рис.4.5 можна зробити висновок, що при збільшенні відстані збільшується затухання сигналу.

Таблиця 4.1. Відповідність розрахованого значення затухання сигналу від відстані

Дальність розповсюдження сигналу d , км	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Затухання сигналу $L_0(d)$, дБ	141	150	156	159	162	165	167	169	170	172

Розрахунок потужності сигналу, що приймається вираховується за рівнянням енергетичного балансу (4.10).

$$P_{\text{пр}} = P_{BS} + G_{BS} - L_B + G_{MS}, \quad (4.10)$$

де P_{BS} - потужність випромінювання БС (Вт).

Тоді за допомогою формул (3.14-3.17) необхідно побудувати графік відповідності ймовірності бітової помилки до дальності d за рахунок розрахованої потужності сигналу.

У розрахунках використовуються багатопозиційні модуляції QPSK, QAM-16, QAM-64 та QAM-256, які імплементовані у стандарті DVB-T2 (на графіку зображені відповідно $P_{bqpsk_{okamura}}(d)$, $P_{e4_{okamura}}(d, 16)$, $P_{e4_{okamura}}(d, 64)$, $P_{e4_{okamura}}(d, 256)$).

Енергетичний потенціал прямопропорційно залежить від потужності передавача, і знаходиться в зворотній залежності від спектральної щільності шумів і бітової швидкості.

За отриманими даними максимальний радіус розповсюдження сигналу за модуляцією QPSK дорівнює $R_{QPSK} = 1,53$ км, QAM-16 - $R_{QAM-16} = 0,91$ км, QAM-64 - $R_{QAM-64} = 0,54$ км, QAM-256 - $R_{QAM-256} = 0,3$ км.

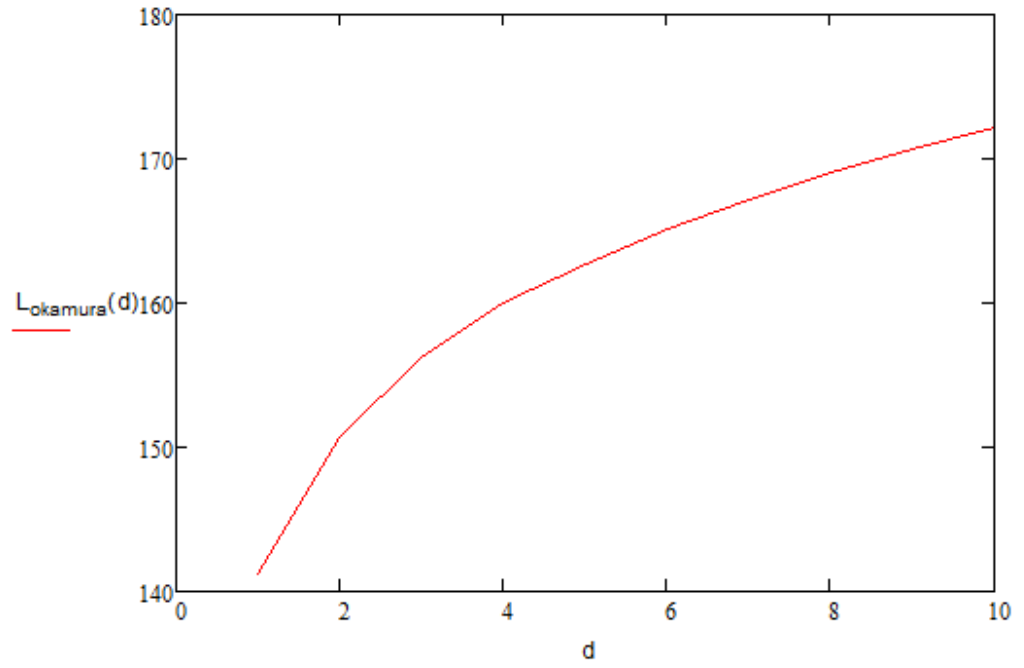


Рисунок 4.5. Графік відповідності затухання сигналу від відстані розповсюдження

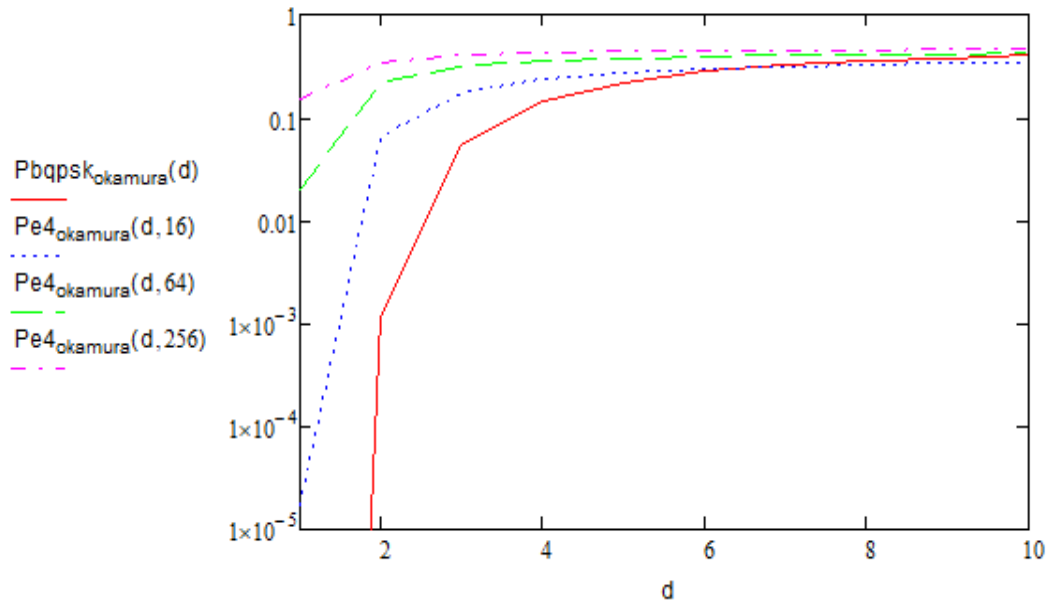


Рисунок 4.6. Залежність ймовірності бітової помилки для різних модуляцій до дальності розповсюдження сигналу

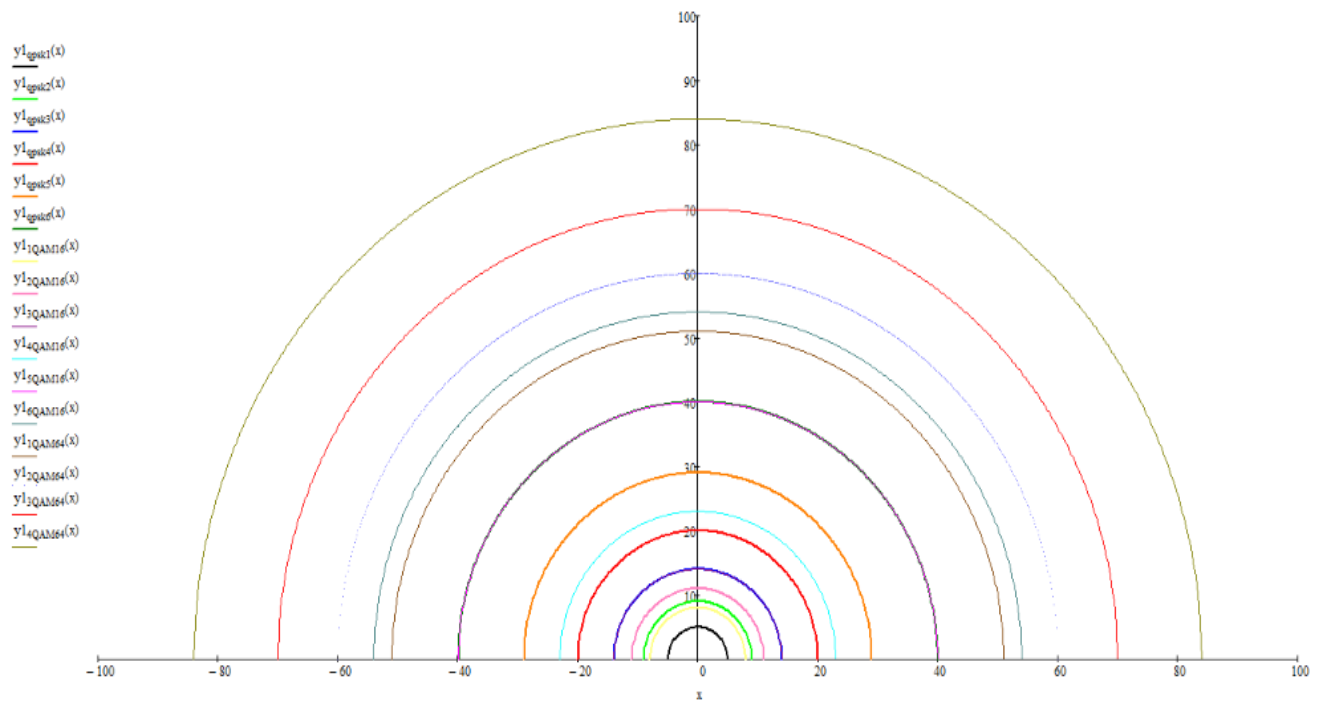


Рис. 4.7. Радіуси розповсюдження багатократної модуляції за градаціями кодування

Радіуси розповсюдження модуляцій з різними швидкостями кодування від відношення сигнал/шум, а саме $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$ побудовано і зображено на рис. 4.7 і 4.8. Всього отримано 24 поєднання градацій кодування модуляцій у вигляді кілець.

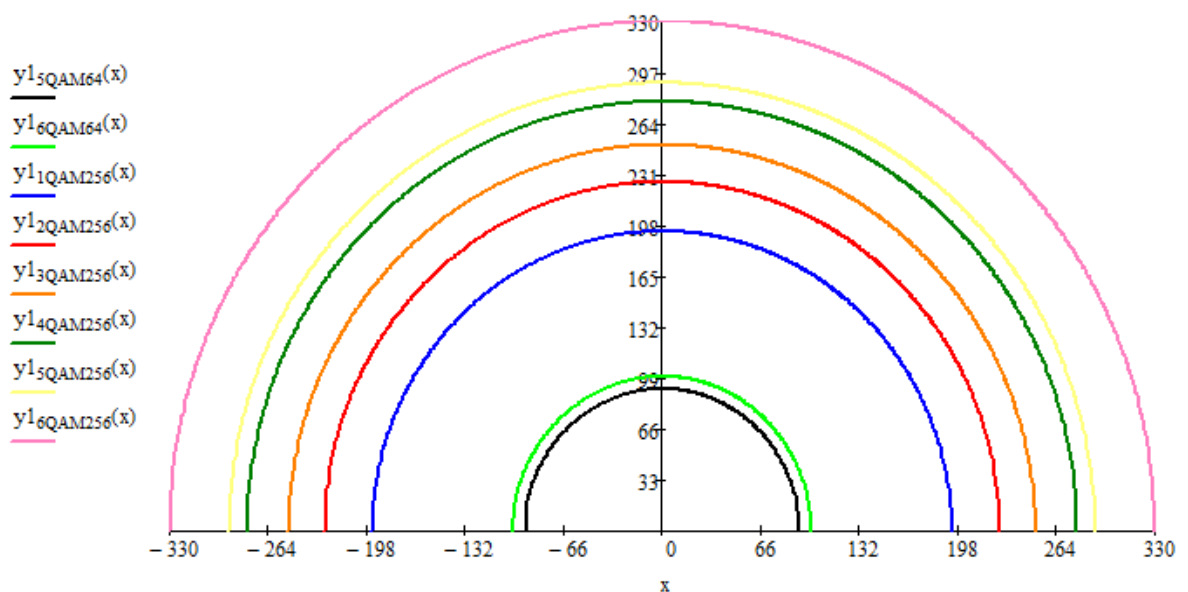


Рисунок 4.8. Радіуси розповсюдження багатократної модуляції за градаціями кодування

Розрахована сумарна продуктивність системи з урахуванням всіх видів модуляцій склала $R_{\Sigma} = 2,6 \cdot 10^9 \text{біт/с}$ для 596 абонентів.

Однак дані показники розраховані за умови використання всіх градацій кодування та різновидності модуляції, але чи доцільно використовувати їх у дуплексній мультисервісній системі.

4.4 Пропозиції щодо вдосконалення процедур стандарту DVB-T2 для транспортування, прийому та обробки інформаційних потоків у МСДС

Очевидно, що стандарт DVB-T2 має великий набір різних сервісів і послуг для передачі та при цьому повинен мати високу продуктивність. Всі ці особливості, з точки зору якості та продуктивності системи, передбачені в телевізійному стандарті, але такі ж характеристики і показники були б корисними і в інших телекомунікаційних системах.

Тому доцільно буде використати ці інструменти та особливості зі стандарту DVB-T2 у дуплексній системі зв'язку, яка буде реагувати на зміни на лінії, наприклад, у випадку термінового розгортання мережі у надзвичайних умовах, коли часу на точні розрахунки енергетики немає, а умови багатопроміневості змінюються. В цьому випадку умови передачі сигналу будуть відповідати конкретним умовам використання та пристосовуватися до змін умов завдяки відповідним адаптивним реагуванням системи.

У стандарті, як і раніше описувалося, використовуються 24 поєднань шістьох градацій кодування та чотирьох видів модуляції. Але чи доцільно використовувати всі ці поєднання у дуплексній системі, а саме у мобільному зв'язку.

Виходячи з цих міркувань за графіком на рис. 4.3 необхідно відібрати ті швидкості кодування, які будуть доцільними у використанні системи.

QPSK у точці переключення на швидкість $1/2$ гарантує необхідну ймовірність помилки 10^{-6} і являється початковою точкою вихідної продуктивності. Інші сходинки кодування, згідно з рис. 4.3, перекриваються вже більш позиційним видом модуляції QAM-16 і тоді градації $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$ від попередньої модуляції QPSK вже не актуальні, тому їх необхідно опустити. За таким принципом вираховуються наступні градації кодування модуляцій.

Отже, для того, щоб остаточно запропонувати виключення непотрібних градацій кодування, необхідно розрахувати за моделлю Окамура-Хати нові значення параметрів системи без їх урахування, за тим фактом, що відсоток втраченої продуктивності невеликий.

Таблиця 4.2. Редукція параметрів СКК

СКК	QPSK	QAM-16	QAM-64
1/2	+	+	-
3/5	-	-	+
2/3	-	+	-
3/4	-	-	+
4/5	-	+	-
5/6	-	-	+

Згідно даних міркувань побудована таблиця 4.2 з запропонованими градаціями швидкостей модуляцій, які можливо підлягають редукції, де “+” позначені ті градації, які залишаються у наборі СКК, а “-” - які відпадають.

Також при розрахунку зон розповсюдження за новими даними варто врахувати максимальний радіус дії модуляції QAM-256, оскільки він відносно невеликий, але для мобільних базових станцій ця модуляція являється занадто потужною.

За новими даними необхідно розрахувати такий параметр системи як сумарна продуктивність за якою буде висновок щодо доцільності виключення деяких швидкостей кодування у процентному відношенні до та після використання швидкостей кодування у СКК.

Розрахована пропускна здатність з урахуванням виключених градацій швидкостей та виключення модуляції QAM-256 для тієї ж кількості абонентів складає $R_{\Sigma} = 2,3 \cdot 10^9$ біт/с.

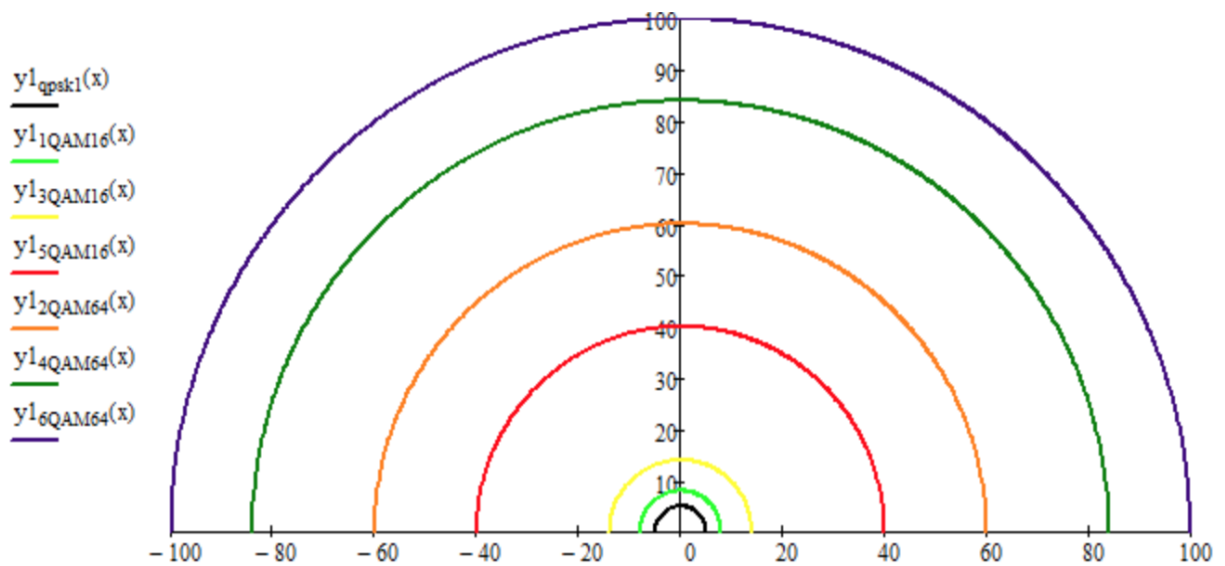


Рисунок 4.9. Радіуси розповсюдження багатократної модуляції з урахуванням редукції параметрів

Розрахований відсоток втрат від редукції між повним набором градацій кодування та зміненим складає лише 11,5%. Оскільки відсоток являється незначним, а враховуючи той факт, що стандарт використовує одразу не всі можливі поєднання СКК, то варто виключити деякі з них при перенесенні особливостей системи у дуплексну мобільну систему.

Отже, при використанні унікальних інструментів стандарту DVB-T2 у дуплексній системі зв'язку, можливо досягти найкращих показників енергетики та пропускної здатності. При умові термінового розгортання мережі, яка реагуватиме на зміні у каналі зв'язку.

Висновки до розділу 4

1. У четвертому розділі проаналізовано способи підвищення продуктивності мультисервісної дуплексної системи.
2. Визначено та розглянуто всі 24 види СКК у поєднанні таких видів модуляцій як QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM та швидкості кодів $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$ у телевізійному стандарті DVB-T2.
3. Описано методику розрахунку продуктивності системи за допомогою методу А.Г. Зюко, а також на основі отриманих даних побудовано графік залежності добутку кодової швидкості завадостійкого коду та інформаційної ємності сигнальної конструкції $(r_c; m)$ від енергетичного показника h^2 .
4. Визначено границі за кодуванням переходу кожного виду кодування при використанні різних видів модуляцій.
5. Побудовано просторові кільця за радіусами розповсюдження відповідно до виду модуляції залежно від показника сигнал/шум.
6. За допомогою просторової моделі Окамура-Хата розрахований ряд найголовніших показників системи, серед них пропускна здатність системи та затухання сигналу.
7. Ґрунтуючись на вирахуваних показниках, з 24 можливих поєднань СКК відібрано лише 7 з них для перенесення їх у МСДС на основі раціональної редукції, а саме поєднання модуляції QPSK зі швидкістю коду $1/2$, модуляції QAM-16 $3/5$, $3/4$ та $4/5$ відповідно, модуляції QAM-64 - $3/5$, $3/4$ та $5/6$. При цьому розрахований відсоток втрат від редукції між повним набором градацій кодування та зміненим складає лише 11,5%.

ВИСНОВКИ

Сучасне суспільство прагне задовольнити власні потреби з боку отримання інформації за допомогою високої швидкості передачі та достовірності, саме тому проблема постає досить гостро в умовах обмежених ресурсів каналів зв'язку, а саме частотних та енергетичних. Перед науковцями та інженерами стоїть завдання як найефективніше використовувати дані ресурси та при цьому не втрачати показники головних параметрів каналу.

Ефективність використання ресурсів каналу описує показник інформаційної ефективності, який являє собою відношення продуктивності до пропускної здатності каналу зв'язку. Для досягнення високого показника інформаційної ефективності необхідно оперувати оптимальним вибором сигнально-кодових конструкцій, які призначені передавати при заданих умовах каналу зв'язку найкращі поєднання швидкості та достовірності.

В ході магістерської роботи детально розглянуто стандарт телевізійного мовлення DVB-T2 та його головні особливості та нововведення для запозичення їх у МСДС з метою підвищення продуктивності при передачі мультисервісної інформації.

На початку роботи сформовано такі важливі складові наукової роботи як мета, об'єкт та предмет дослідження, визначені задачі, що вирішуються у подальших розділах, актуальність дослідження.

Спочатку проаналізовано перетворення стандарту DVB-T2, його головні відмінності від попередника DVB-T. Тоді за певними критеріями та вимогами обрано тип МСДС та досліджено вплив енергетичних факторів на продуктивність системи та його пропускну здатність.

Проаналізовано телевізійний стандарт та процедури обробки, передачі та прийому сигналів, визначено головні типи мультисервісних даних, що передаються за допомогою стандарту телевізійного мовлення.

Класифіковано методи розрахунку зон покриття в безпроводових мережах за порівняльним аналізом просторових моделей. За результатами обрана модель Окамура-Хата для розрахунку показників МСДС, у тому числі й продуктивності.

Досліджено основні показники продуктивності вибраної МСДС при використанні стандарту DVB-T2. Описані особливості визначення продуктивності, пропускну здатності.

За допомогою декількох методик розраховано та порівняно значення збігу ймовірностей символної та бітової помилок, а саме за векторно-фазовим методом та за допомогою формул Дж. Прокіса представлені аналітичні та графічні результати. Додатково побудовано таблицю з порівнянням бітової та символної ймовірності помилок за різними методами обчислення.

Проаналізовано та описано способи підвищення продуктивності МСДС, зокрема, відмічено застосування багатопозиційних сигналів у комбінації із раціональною швидкістю кодів при обмеженому частотно-енергетичному ресурсі.

Проведений розрахунок продуктивності, який зводиться до розрахунку показника інформаційної ефективності, та за допомогою цього побудовано графік залежності добутку кодової швидкості завадостійкого коду та інформаційної ємності сигнальної конструкції ($r_c m$) від енергетичних показників каналу.

За допомогою вищевказаного графіка, визначено 24 сходинки перемикання комбінацій швидкостей кодів $1/2$, $3/5$, $2/3$, $3/4$, $4/5$, $5/6$ та модуляцій QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM, запозичених зі стандарту DVB-T2. Розраховані найголовніші показники каналу зв'язку за допомогою просторової моделі Окамура-Хата, такі як дальність розповсюдження сигналу, продуктивність системи та інші, з урахуванням всіх модуляцій та градацій кодування. Згідно розрахованих даних висунуто припущення щодо

доцільності використання всіх градацій кодування та підлягання редукції деяких з них заради того, щоб використати у дуплексній системі зв'язку.

Розрахований відсоток втрат від редукції між повним набором градацій кодування (24 позиції комбінування СКК) та зміненим (7 відсортованих поєднань СКК - QPSK зі швидкістю кода $1/2$, QAM-16 - $3/5$, $3/4$ та $4/5$, модуляції QAM-64 - $3/5$, $3/4$ та $5/6$) складав лише 11,5%. Цей відсоток є незначним для системи зв'язку, і враховуючи той факт, що стандарт використовує одразу не всі можливі поєднання СКК, то запропоновано виключити деякі з них при перенесенні особливостей системи у дуплексний мобільний зв'язок.

У висновку слід відмітити, що при використанні особливих потужних інструментів та інновацій стандарту DVB-T2 у МСДС, є можливість отримати найкращі співвідношення таких показників, як продуктивність та енергетика каналу.

Отже, поставлена мета досягнута, задачі роботи виконано у повній мірі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Карякин В.Л. Дистанционное обучение технологиям цифрового телевидения DVB-T2 / Карякин В.Л., Карякин Д.В.. // Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education. – 2012.
2. Ю.М. Кирик. Изучение построения и функционирования системы приема цифрового эфирного телевидения стандарта DVB-T2 / Ю.М. Кирик, Р.И. Колотушкин, Г.И. Сорокин. – Москва, 2015. – 31 с.
3. М.И. Курячий. Исследование и разработка интерактивных устройств для повышения помехоустойчивости систем эфирного цифрового телевизионного вещания: дис.канд.техн. аук / М.И. Курячий, 2014. – 185 с.
4. Приемники для эфирного цифрового телевизионного вещания DVB-T2. Основные параметры. Технические требования / Разработан АО "Московский научно-исследовательский телевизионный институт". – Москва: Стандартинформ, 2014. – 31 с.
5. Балашов В.А. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами / Балашов В.А., Воробиенко П.П., Ляховецкий Л.М., 2012.
6. Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2). – Draft ETSI EN 302 755 V1.4.1, February 2015.
7. Стандарты наземного эфирного цифрового телевидения DVB-T и DVB-T2. – 2011. – С. 19.
8. Карякин В.Л. Цифровое телевидение / Карякин В.Л., 2013. – С.451.
9. Телекоммуникационные системы и сети / Величко В.В., Субботник Е.А., Шувалов В.В., Ярославцев А.Ф.. – Москва, 2005. – (Горячая линия - Телеком).
10. Телевизионные цифровые системы – Екатеринбург, 2016. – (Издательство Уральского университета).
11. Дворкович В.П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) / Дворкович В.П., Дворкович А.В.. – Москва, 2012. – 1009 с.

12. Берлин А. Н. Цифровые сотовые системы связи [Текст] / А. Н. Берлин. – М. : Эко-Трендз, 2007. – 296 с.
13. Зюко А. Г. Помехоустойчивость и эффективность систем связи [Текст] / А. Г. Зюко // 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Связь, 1972. – 360 с.
14. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи [Текст] / Дж. Кларк, Дж. Кейн. – М. : Радио и Связь, 1987. – 195 с.
15. Баляр В.Б. Порівняльна характеристика систем цифрового наземного телевізійного мовлення у стандартах DVB-T/T2 / Баляр В.Б., Гофайзен О.В. // Цифрові Технології, No 11, 2012. – 2012. – С. 31–46.
16. Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2), 2010. – 177 с. – (ETSI EN 302 755 V1.2.1).
17. Коржик В. И. Расчет помехоустойчивости систем передачи дискретных сообщений: справочник / В. И. Коржик, Л. М. Финк, К. Н. Щелкунов. – М. : Радио и связь, 1981. – 231 с.
18. ENENSYS Technologies. Преимущества использования нескольких каналов PLP в системе DVB-T2: перевод Satellite LTD <http://www.satellite.ru/files/articles/22.pdf> // Франция. - 13 с.
19. Мамедов Г.А. Дослідження і оцінка характеристик продуктивності ланки мультисервісних мереж телекомунікації / Мамедов Г.А., Ібрагімов Б.Г., Саттарова Г.А.. // Інформаційні технології та комп'ютерна техніка. – 2011.
20. Попов А.С. Применение методов Окамура-Хата и Введенского для расчета зон покрытия цифровых телевизионных передатчиков / Попов А.С.. // Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2010. – С. 176–179.
21. Урывский Л. А., Прокопенко Е. А., Наталенко А. И. Векторно-фазовый метод для определения показателей помехоустойчивости многопозиционных сигналов. – Зв'язок, № 12, 2012. – 7 с.

22. Прокопенко Е.А. Повышение информационных возможностей каналов с многопозиционными сигналами в системах беспроводной связи: дис. канд. техн. наук / Прокопенко Е.А. – Киев, 2013. – 175 с.
23. Шинкаренко Е.М. Электрические аппараты / Шинкаренко Е.М. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2004. – 71 с.
24. Осипчук С.А. Повышение информационной эффективности беспроводных систем передачи на основе перераспределения ресурсов канала связи : дис. канд. техн. наук / Осипчук С.А., 2015. – 182 с.
25. Пешкін А.М. Формування сигнально-кодкових конструкцій на основі кодів, забезпечуючих максимальне наближення до границі Шеннона: дис. канд. техн. наук / К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 149 с.
26. Шевченко М.В. Аналіз алгоритмів підтримання достовірності в каналі зв'язку зі стандартом 802.11n: дипл. бакалавра / К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – 80 с.
27. Уривський Л. О., Прокопенко Е.А., Вергун С.Н. Дослідження екстремумів продуктивності в дискретних каналах зв'язку з кодуванням // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку Вергун С.Н. — Київ, 2014. — С.20-26.
28. Гришин А.М. Анализ производительности канала мультисервисной сети обслуживания населения / Гришин А.М., Бурковский В.Л.. // Воронежский государственный технический университет.
29. Банкет В.Л. Сигнально-кодвые конструкции в телекоммуникационных системах / Банкет В.Л. – Одесса, 2009. – 180 с.
30. Попов А.С. Исследование и разработка интерактивных устройств для повышения помехоустойчивости систем эфирного цифрового телевизионного вещания: дис. канд. техн. наук / Попов А.С. – Томск, 2015. – 200 с.
31. Каримов М. К. Услуги в сфере телекоммуникации и их продвижение // Молодой ученый. — 2015. — №13. — С. 35-37.

32. Дворников С.В. Упрощенное представление модели Nata для расчета затухания сигнала на открытых трассах // Радиотехника и связь / Дворников С.В. – Санкт-Петербург. – С. 6-10.
33. Михайлова А. Ю. Исследование распространения дециметровых волн в зонах со сложным рельефом на основе статистических моделей / Михайлова А. Ю., Борисов А. П., 2015. – С. 137–141.
34. Бригинець Я.І. Сучасний стан і перспективи розвитку систем мобільного зв'язку стандарту GSM // ПТ-2007 / Бригинець Я.І., 2007. – С. 83–87.
35. Стрюк Я.Г. Стандарт цифрового телевидения DVB-T2 // Учебное пособие / Стрюк Я.Г. – Москва: МТУСИ. – С. 3.
36. Бишовець Г. Ю. Використання технології частотно-ортогонального мультиплексування в LTE / Г. Ю. Бишовець // Системи управління, навігації та зв'язку. - 2013. - Вип. 4. - С. 97-100.
37. Урывский Л. А., Осипчук С.А. Синтез сигнально-кодовых конструкций для OFDM сигналов в канале с постоянными параметрами. – Научно-виробничий збірник «Наукові записки УНДІЗ», №4 (32), 2014. – с. 41-48.
38. Уривський Л. О. Патент на корисну модель No UA 94019 U «Спосіб адаптивного вибору виду багатопозиційної модуляції», публікація відомостей про видачу патенту: 27.10.2014. Винахідники: Уривський Л.О., Осипчук С.О., Прокопенко К.А.
39. Уривський Л. О. Методика оцінки граничної інформаційної ефективності завадостійких кодів// Уривський Л.О., Пешкін А.М.// Information and Telecommunication Sciences, – К.: NTUU 'KPI'. – 2016. – No 2. – p.70-74.
40. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений [Текст] / Л. М. Финк ; М. : «Советское радио», 1970. – 728 с.
41. MacKay D. “Good error-correcting codes based on very sparse matrices,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 45, no. 2, March 1999. – pp. 339–431.

42. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. – Москва: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
43. У. Питерсон, Э. Уэлдон. Коды, исправляющие ошибки: Пер. с англ. – М.: «Мир», 1976. – 593 с.
44. E. PINSON. Feeding DVB-T2 transmitters with redundant IP networks / E. PINSON. // TemCast.
45. Брагин А.С., Нестеренко И.К. Основы управления использованием радиочастотного ресурса. – К.:НТУУ «КПИ», 2003. – 374 с.
46. Nee R. V. OFDM For Wireless Multimedia Communications [Text] / R. V. Nee, R. Prasad / Norwood, MA: Artech House, 2000. – 426 p.
47. Tobias Vieracker. Planning DVB-T2. Advance and challenge / Tobias Vieracker. // LS telcom.
48. Lu B., Wang X. and Narayanan K.R. BLDPC-based space-time coded OFDM systems over correlated fading channels: Performance analysis and receiver design, [in Proc. 2001 IEEE Int. Symp. Information Theory (ISIT '01), Jun. 24-29, 2001, vol. 1, p. 313.
49. Sklar B. Rayleigh Fading Channel in Mobile Digital Communication System. Part II: Mitigation // IEEE Communications Magazine. -1997. – 35, N 7. – P.102-109.
50. Uryvsky L.O., Shevchenko M.V. Perspectives of transformation of algorithms of noise-immune signaling of DVB-T2 standard into a duplex communication system // International Conference “TELECOMMUNICATIONS ISSUES - 2017”.-p.458-461
51. Уривський Л.О., Шевченко М.В. Особливості передачі мультисервісних потоків в стандарті DVB-T2 та використання їх у дуплексній лінії зв'язку // XII МНТК «Проблеми телекомунікацій», ІТС НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», м. Київ, 2018.-с.48-51

ДОДАТОК А

ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОПОЗИЦІЙНИХ СИГНАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

```

%% 1 Graphics of QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256 modulation using
Prokis methog
close all; clear all;
SNR_perSymbol_dB=[-3:0.1:42];
SNR_perSymbol=10.^(SNR_perSymbol_dB/10);
plotPerBitX=[]; plotY=[];
% number of constellation points (M-ary QAM)
for M=[4, 16, 64, 256]
    % the energy of each symbol is used to transmit log2(M) bits
    SNR_perBit=SNR_perSymbol/log2(M);
    % [1] 5.2-78 argument of Q(...)
    Qarg=sqrt(3/(M-1)*SNR_perSymbol);
    % [1] 2.1-98
    Q=1/2*erfc(Qarg/sqrt(2));
    % [1] eq. 5.2-77
    % probability of error for PAM per quadrature signal
    PsqrtM=2*(1-1/sqrt(M))*Q;
    % [1] eq. 5.2-79
    PM=1-(1-PsqrtM).^2;
    plotPerBitX=[plotPerBitX; 10*log10(SNR_perBit)];
    plotY=[plotY; PM];
end
figure(1);
h = semilogy(SNR_perSymbol_dB', plotY'); grid on;
set(h, 'lineWidth', 3);
title('SER'); xlabel('SNR per symbol (dB)'); ylabel('symbol
error rate');
xlim([0, 40]); ylim([1e-6, 1]);
legend({'QPSK', '16QAM', '64QAM', '256QAM'});
x=[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23
24 25 26 27 28 29 30]
Qpsk = [0.0786  0.0562  0.0375  0.0228  0.0125  0.0059  0.0023
7.72E-4  1.90E-4  3.36E-5  3.87E-6  2.61E-7  9.00E-9  1.33E-10
6.81E-13  9.12E-16  2.26E-19  6.75E-24  1.39E-29  1.00E-36
1.04E-45  5.29E-57  3.29E-71  4.42E-89  1.44E-111  7.30E-140
1.79E-175  2.73E-220  1.06E-276  0.0  0.0]
Qam16 = [0.1409  0.1189  0.0977  0.0774  0.0586  0.0418  0.0278
0.0169  0.0092  0.0043  0.0017  5.64E-4  1.38E-4  2.42E-5
2.76E-6  1.84E-7  6.25E-9  9.07E-11  4.52E-13  5.87E-16  1.40E-

```

```

19 3.98E-24 7.73E-30 5.13E-37 4.85E-46 2.17E-57 1.16E-71
1.28E-89 3.27E-112 1.21E-140 2.02E-176]
Qam64 =[0.1998 0.1779 0.1569 0.1371 0.1185 0.1007 0.0838
0.0675 0.0523 0.0384 0.0265 0.0168 0.0097 0.0049 0.0021
7.72E-4 2.17E-4 4.49E-5 6.35E-6 5.53E-7 2.63E-8 5.84E-10
4.97E-12 1.26E-14 7.05E-18 5.81E-22 4.32E-27 1.55E-33
1.23E-41 8.03E-52 1.24E-64]
Qam256 = [0.2546 0.2360 0.2170 0.1976 0.1783 0.1593 0.1411
0.1239 0.1078 0.0928 0.0785 0.0650 0.0520 0.0399 0.0290
0.0198 0.0123 0.0069 0.0034 0.0014 5.05E-4 1.35E-4 2.63E-
5 3.44E-6 2.72E-7 1.14E-8 2.17E-10 1.52E-12 3.03E-15
1.24E-18 6.96E-23]
figure(2)
h=semilogy(x,Qpsk,x,Qam16,x,Qam64,x,Qam256);grid on;
set(h, 'lineWidth', 3);
title('BER'); xlabel('SNR per symbol (dB)'); ylabel('bit error
rate');
xlim([0, 40]); ylim([1e-6, 1]);
legend({'QPSK', '16QAM', '64QAM', '256QAM'});

%% 2 Analysing of QPSK, QAM-16, QAM-64, QAM-256 modulation using
Prokis methog
clear all
clc
for h = 1:50
pc_QPSK(h) = 0.75-0.5*erf(sqrt(h))-0.25*(erf(sqrt(h))).^2;
pb_QPSK(h) = 0.5*(1-erf(sqrt(2*h)*cos(pi/4)));
M=16;
k=log2(M);
fun = @(u)exp((-1*(u.^2))/2);
format long
q(h) = integral(fun,sqrt(3*h*k/(M-1)),Inf,'RelTol',1e-
8,'AbsTol',1e-13);
result(h)=1-(1-(2*(1-1/sqrt(M))/sqrt(2*pi)*q(h))).^2;
M=64;
k=log2(M);
fun = @(u)exp((-1*(u.^2))/2);
format long
q1(h) = integral(fun,sqrt(3*h*k/(M-1)),Inf,'RelTol',1e-
8,'AbsTol',1e-13);
result1(h)=1-(1-(2*(1-1/sqrt(M))/sqrt(2*pi)*q1(h))).^2;
M=256;
k=log2(M);
fun = @(u)exp((-1*(u.^2))/2);
format long

```



```

q2(h) = integral(fun,sqrt(3*h*k/(M-1)),Inf,'RelTol',1e-
8,'AbsTol',1e-13);
result2(h)=1-(1-(2*(1-1/sqrt(M))/sqrt(2*pi)*q2(h))).^2;
end
pc_QPSK
pb_QPSK
result
result1
result2
h=1:1:15
figure(1)
semilogy(h,pb_QPSK(h))

%% 3 Analysing modulation using vektorno-fasovyi method
close all;
clear all;
for h=1:50
    % P6_QPSK
    fun = @(u)exp(-(h.^2)./((sin(u)-cos(u)).^2));
    q(h) = integral(fun,0.25*pi,1.25*pi);
    PbQPSK(h) = (0.5/pi).*q(h);
    % QAM16 Pow_6_1
    fun1 = @(u)exp(-(h.^2)./(2.*((cos(u)-sin(u)).^2)));
    q1(h) = integral(fun1,0.25*pi,1.25*pi);
    fun2 = @(u)exp((-
5.*(h.^2))./(18.*((cos(u)+sin(u)./3).^2)));
    q2(h) = integral(fun2,atan(3),pi+atan(3));
    fun3 = @(u)exp(-(h.^2)./(18.*((sin(u)-cos(u)).^2)));
    q3(h) = integral(fun3,0.25*pi,1.25*pi);
    Pb1(h) = (q1(h)+q2(h)+q3(h))/(8*pi);
    % QAM16 Pow_6_2
    fun1 = @(u)exp(-(h.^2)./(18.*((cos(u)-sin(u)).^2)));
    q1(h) = integral(fun1,0.25*pi,1.25*pi);
    fun2 = @(u)exp((- (h.^2))./(50.*((cos(u)-sin(u)).^2)));
    q2(h) = integral(fun2,0.25*pi,1.25*pi);
    fun3 = @(u)exp(-(h.^2)./(18.*((cos(u)-sin(u)).^2)));
    q3(h) = integral(fun3,-0.75*pi,1.25*pi);
    Pb2(h) = (q1(h)+q2(h)+q3(h))/(4*pi);
    %QAM16 SUM
    QAM16(h) = (Pb1(h) + Pb2(h))./2;

    % Ps_QPSK
    fun5 = @(u)exp((- (h.^2))./((sin(u).^2).*(1-cot(u)).^2));
    q(h) = integral(fun5,0.5*pi,pi);
    result5(h) = q(h)./pi;
end

```

```
format compact
result5
x=1:1:50;
figure(1)
g = semilogy(x, PbQPSK(x), x, QAM16(x)); grid on;
set(g, 'lineWidth', 3);
xlim([1, 30]); ylim([5*1e-5, 1]);
legend({'QPSK', 'QAM-16'});
figure(2)
g = semilogy(x, result5(x)); grid on;
set(g, 'lineWidth', 2);
xlim([1, 40]); ylim([1e-6, 1]);
legend({'QPSK'});
```